



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Patentschrift
10 DE 196 30 391 C 1

51 Int. Cl.⁶:
H 04 L 1/00
H 04 L 27/00
H 04 J 13/00
// H04J 13/00, H04B
1/69

21 Aktenzeichen: 196 30 391.5-31
22 Anmeldetag: 26. 7. 96
43 Offenlegungstag: —
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 24. 7. 97

DE 196 30 391 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:
Klein, Anja, Dipl.-Ing., 67700 Niederkirchen, DE;
Baier, Paul Walter, Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing., 67661
Kaiserslautern, DE; Schlee, Johannes, Dipl.-Ing.,
67657 Kaiserslautern, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

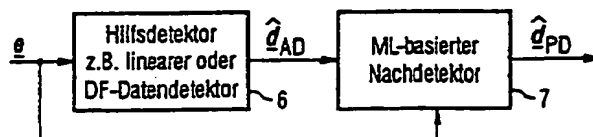
DE 1 95 09 887 A1
DE 41 21 356 A1

US-Z.: VERDU, S.: Minimum Probability of Error for
Asynchronous Gaussian Multiple Access
Channels in: IEEE Trans. IT 32, 1986, S. 85-96;
US-Z.: EWERBRING, M. et al.: CDMA with
interference cancellation: A Technique for High
Capacity Wireless Systems. In: Proc. Int. Conf.
Commun. Genf, 1993 S. 1901-1908;
US-Z.: DENT, P. et al: CDMA-IC: A Novel Code

Division Multiple Access Scheme Based on
Interference Cancellation. In: Proc. Symp. Personal,
Indoor and Mobile Radio Commun., Boston, 1992,
S. 98-102;
DE-B: HÖHER, P.: On Channel Coding and Multiuser
Detection for DS-CDMA. In: ITG-Fachbericht 124,
Mobile Kommunikation, 27.-29.9.1993, VDE-Verlag
GmbH, Berlin, S. 55-66;
US-Z.: SESHARDRI, N.: et al.: On Post Decision
Symbol-Reliability Generation. In: IEEE-Inter- national
Conference on Communication 93, Genf, S. 741-745;

54 Verfahren zur empfangsseitigen Datendetektion in einem Übertragungssystem

57 Beim Verfahren nach der Erfindung ist vorgesehen, daß im
Empfänger für das aus einer additiven Überlagerung von K
nach einer Übertragung verzerrten Datenfolgen und einem
ev. zusätzlichen Störsignal bestehende Empfangssignal in
einer zweistufigen Detektion zunächst suboptimale Probe-
schätzwerte der Datensymbole und anschließend zu deren
Überprüfung und ggf. Ersatz Maximum Likelihood (ML)-ba-
sierte Schätzwerte ermittelt werden, wobei in einer ersten
Variante das ML-Kriterium nur bei einem zweckmäßig
ausgewählten Teil aller Datensymbole oder/und in einer
zweiten Variante eine suboptimal wirkende Annäherung des
zu optimalen ML-basierten Schätzwerten führenden Krite-
riums eingesetzt wird. Das Verfahren nach der Erfindung
läßt sich z. B. bei CDMA-Signalübertragungssystemen im
Zusammenhang mit Mobilfunk verwenden.



DE 196 30 391 C 1

BEST AVAILABLE COPY

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf Verfahren zur empfangsseitigen Datendetektion in einem System zur Übertragung von K aus Datensymbolen bestehenden Datenfolgen über einen Kanal oder K im allgemeinen unterschiedliche Kanäle, wobei jedem der Datensymbole der K Datenfolgen vor der Übertragung eine jeder Datenfolge zugeordnete spezifische Signalform zur Bildung der K Sendesignale aufmoduliert wird und aus dem aus der additiven Überlagerung der K verzerrten Sendesignale und eines möglicherweise zusätzlich auftretenden Störsignals bestehenden Empfangssignal unter Verwendung einer auf einer suboptimalen Maximum Likelihood (ML)-Schätzung basierenden zweistufigen Datendetektion, die sich aus einer einen Probeschätzwert von Datensymbolen der K Datenfolgen liefernden suboptimalen Hilfsdetektions-Stufe und aus einer sich daran anschließenden, auf einer Maximum Likelihood-Schätzung basierenden Nachdetektions-Stufe zur Prüfung des Probeschätzwertes aufgrund eines Maximum Likelihood-basierten Kriteriums zusammensetzt, ein endgültiger Schätzwert der Datensymbole der K Datenfolgen gewonnen wird, wobei die in der Hilfsdetektions-Stufe gewonnenen Probeschätzwerte der Datensymbole mit den entsprechenden Datensymbol-Schätzwerten der Maximum Likelihood-Schätzung auf Übereinstimmung geprüft und bei Unterschiedlichkeit geändert, d. h. durch die auf der Maximum Likelihood-Schätzung beruhenden Werte ersetzt werden.

Aus Verdu, S.: "Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple Access Channels" in IEEE Trans. IT 32 (1986), Seiten 85-96 ist ein nichtlinearer optimaler Detektor zur Bestimmung von Schätzwerten der Datensymbole der K Eingangsdatenfolgen bekannt. Die Komplexität dieses Detektors steigt mit der Anzahl K der zu verarbeitenden Datenfolgen exponentiell an. Aufgrund seiner hohen Komplexität ist aber dieser bekannte Detektor auch für kleinere Zahlen K zur Zeit nicht zu realisieren.

Es sind außerdem lineare Verfahren zum Ermitteln von Schätzwerten der Datensymbole der K Eingangsdatenfolgen bekannt. In diesem Zusammenhang sind in dem Buch von Proakis, J.G.: "Digital Communications", New York, McGraw-Hill, 1989, die signalangepaßte Filterung und der sogenannte RAKE-Empfänger beschrieben. Erwartungstreue lineare Schätzungen minimaler Varianz sind in DE 41 21 356 A1 angegeben.

In Ewerbring, M.; Gudmundson, B.; Larrson, G.; Teder, P.: "CDMA with interference cancellation: A Technique for High Capacity Wireless Systems", Proc. Int. Conf. Commun., Genf, 1993, Seiten 1901 bis 1906 und in Dent, P.; Gudmundson, B.; Ewerbring, M.: "CDMA-IC: A Novel Code Division Multiple Access Scheme Based on Interference Cancellation", Proc. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun., Boston, 1992, Seiten 98 bis 102 ist ein Verfahren beschrieben, bei dem ein RAKE-Empfänger, der auf dem Prinzip der signalangepaßten Filterung beruht, um eine quantisierte Rückkopplung erweitert wird. Das Kriterium, das zur Auswahl der zu subtrahierenden bzw. zu eliminierenden Schätzwerte herangezogen wird, ist dabei die Energie oder die Leistung des Anteils des k-ten Sendesignals ($k = 1 \dots K$) am Empfangsort bzw. eine Schätzung für diese Energie oder Leistung. Dieses Kriterium ist somit nur dazu geeignet, eine Unterscheidung zwischen den zu verschiedenen Eingangsdatenfolgen gehörenden Datensymbolen zu treffen, aber nicht dazu, eine Differenzierung zwischen Datensymbolen ein und derselben Eingangsdatenfolge vorzunehmen. Außerdem ist dieses bekannte Verfahren für den Fall wenig geeignet, bei dem die am Empfangsort ankommenden K Energien oder Leistungen ziemlich gleich sind.

In DE 195 09 867.6 ist bereits ein demgegenüber verbessertes Verfahren zur empfangsseitigen Datendetektion in einem Übertragungssystem vorgeschlagen. Dabei werden im Empfänger wertkontinuierliche vorläufige Schätzwerte einiger oder aller Datensymbole der K Eingangsdatenfolgen nach einem linearen Verfahren und ein Vertrauensmaß für die Schätzwerte ermittelt. Durch die hier vorgesehene Kombination eines linearen Schätzverfahrens mit einer quantisierten Rückkopplung, wobei die rückzukoppelnden Daten anhand eines für jeden Schätzwert zu bestimmenden, speziellen Vertrauensmaßes ausgewählt werden, läßt sich je nach gewähltem Vertrauskriterium entweder die Leistungsfähigkeit gegenüber den vorher bekannten Verfahren steigern oder der Rechenaufwand verringern.

Ein weiteres Verfahren zur empfangsseitigen Datendetektion in einem Übertragungssystem für K aus Datensymbolen bestehende Datenfolgen ist aus dem Beitrag von Höher, P.: "On Channel Coding and Multiuser Detection for DS-CDMA", ITG-Fachbericht 124, Mobile Kommunikation, Vorträge der ITG-Fachtagung vom 27.-29.09.1993 in Neu-Ulm, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Seiten 55-66 und aus dem Beitrag von Seshadri, N.; Höher, P.: "On Post-Decision Symbol-Reliability Generation", IEEE International Conference on Communications '93, 23.-26.05.1993, Genf, Seiten 741-745 bekannt. Hierbei wird jedem der Datensymbole der K Datenfolgen vor der Übertragung eine jeder Datenfolge zugeordnete spezifische Signalform zur Bildung der K Sendesignale aufmoduliert. Aus dem aus der additiven Überlagerung der K verzerrten Sendesignale bestehenden Empfangssignal wird dann unter Verwendung einer auf einer suboptimalen Maximum Likelihood (ML)-Schätzung basierenden zweistufigen Datendetektion, die sich aus einer einen Probeschätzwert von Datensymbolen der K Datenfolgen liefernden suboptimalen Hilfsdetektions-Stufe und aus einer sich daran anschließenden, auf einer Maximum Likelihood-Schätzung basierenden Nachdetektions-Stufe zur Prüfung des Probeschätzwertes aufgrund eines Maximum Likelihood-basierten Kriteriums zusammensetzt, ein endgültiger Schätzwert der Datensymbole der K Datenfolgen gewonnen. Dabei werden die in der Hilfsdetektions-Stufe gewonnenen Probeschätzwerte der Datensymbole mit den entsprechenden Datensymbol-Schätzwerten der Maximum Likelihood-Schätzung auf Übereinstimmung geprüft und bei Unterschiedlichkeit geändert, d. h. sie werden durch die auf der Maximum Likelihood-Schätzung beruhenden Werte ersetzt. Die im Zusammenhang mit diesem bekannten Datendetektionsverfahren angegebenen Schätzalgorithmen erfordern aber aufgrund ihrer Komplexität immer noch einen ziemlich umfangreichen Rechenaufwand, sofern man bezüglich der Leistungsfähigkeit bei der Detektion der übertragenen Daten keine allzu starken Abstriche machen möchte. Weiterhin ist die Konvergenz des Datendetektionsverfahrens nicht sichergestellt.

Aufgabe der Erfindung ist es, zur Lösung des Datendetektionsproblems Kriterien für eine in suboptimaler

Weise erfolgende Bestimmung Maximum Likelihood (ML)-basierter Schätzwerte der Komponenten der gemeinsam empfangenen Datenfolgen anzugeben, so daß sich je nach Wahl der Parameter entweder eine verbesserte Leistungsfähigkeit oder eine Aufwandsreduzierung gegenüber den bisherigen Lösungen ergibt und daß die Konvergenz des Datendetektionsverfahrens sichergestellt ist.

Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung beim gattungsgemäßen Verfahren in einer ersten Variante dadurch gelöst, daß das in der Nachdetections-Stufe durchgeführte und auf der Maximierung der Wahrscheinlichkeit bezüglich der Datensymbole im empfangenen Signal beruhende Kriterium zur Ermittlung des optimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwerts von Datensymbolen nur bei einem ausgewählten Satz aller Datensymbole anstelle bei allen Datensymbolen verwendet wird und daß als Konsequenz davon nur ein entsprechend ausgewählter Satz der in der Hilfsdetections-Stufe ermittelten Probeschätzwerte auf Übereinstimmung geprüft und bei Unterschiedlichkeit geändert, d. h. durch auf der Maximum Likelihood-Schätzung beruhende Werte ersetzt wird.

Eine andere, auf dem gleichen Erfindungsprinzip beruhende Lösungsvariante dieser Aufgabe besteht darin, daß anstelle des zu optimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwerten für die übertragenen Datensymbole der K Datenfolgen führenden Kriteriums in der Nachdetections-Stufe zur Prüfung der in der Hilfsdetections-Stufe ermittelten Probeschätzwerte ein Kriterium benutzt wird, das aufgrund des Ersatzes der Maximierung der Wahrscheinlichkeit bezüglich der Datensymbole im empfangenen Signal durch eine Annäherung zu suboptimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwerten führt.

Die beiden vorstehend angegebenen Varianten lassen sich auch kombinieren, was bedeutet, daß das zu einem suboptimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwert führende Kriterium lediglich bei einem ausgewählten Satz aller Datensymbole angewandt wird.

Zweckmäßige Weiterbildungen und Ausführungsmöglichkeiten zu den beiden Lösungsvarianten sind in den Unteransprüchen angegeben.

Die Lösung des Datendetektionsproblems gemäß der Erfindung ist allgemein im Zusammenhang mit jedem System zur Datenübertragung einsetzbar und insbesondere auch in Verbindung mit einem CDMA (Code Division Multiple Access)-System anwendbar.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von in Figuren dargestellten Ausführungsbeispielen, die sich auf ein CDMA-System beziehen, erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Übertragungsmodell in einem Blockschaltbild,

Fig. 2 ein Blockschaltbild zur Verdeutlichung der Problemstellung,

Fig. 3 in einem Blockschaltbild die Struktur eines Maximum Likelihood (ML)-basierten zweistufigen Datendetektors, und

Fig. 4 in einem Beispiel Operationen bei der Durchführung einer parallelen Nachdetection.

Bei der folgenden Beschreibung eines zeitdiskreten Systemmodells werden Vektoren und Matrizen in kleinen bzw. großen Buchstaben fettgeschrieben, komplexe Größen sind unterstrichen. Die komplexe Konjugation bzw. die Transposition werden durch $(\cdot)^*$ bzw. $(\cdot)^T$, die Bildung des Erwartungswertes wird durch $E(\cdot)$ beschrieben.

In Fig. 1 ist ein Diskretzeit-Übertragungsmodell für die Eingangsdatenfolgen $\underline{d}^{(1)} \dots \underline{d}^{(K)}$, $k=1 \dots K$, dargestellt. Nach einer Modulation bzw. Codierung mit einem für jede Datenfolge spezifischen Code $\underline{c}^{(1)} \dots \underline{c}^{(K)}$, $k=1 \dots K$, in Codierern 1 gelangen die jeweiligen Ausgangssignale als Sendesignale auf die Übertragungskanäle 2 mit den Kanalimpulsantworten $\underline{h}^{(1)} \dots \underline{h}^{(K)}$, $k=1 \dots K$. Nach den Übertragungsstrecken laufen die Signale in Form von resultierenden Signalbeiträgen $\underline{e}^{(1)} \dots \underline{e}^{(K)}$, $k=1 \dots K$, in einem Summierglied 3 zusammen. Mittels eines weiteren Summierglieds 4 wird ein auf dem Übertragungsweg additiv anfallendes Störsignal \underline{n} zugeführt. Das Ausgangssignal \underline{e} des Summierglieds 4 stellt ein in einem Empfänger empfangenes Signalgemisch dar. Der Datenvektor $\underline{d}^{(k)}$ eines Teilnehmers k wird somit über den Kanal mit einer kombinierten Kanalimpulsantwort $\underline{b}^{(k)}$ übertragen. Die Überlagerung des resultierenden Beitrags $\underline{e}^{(k)}$ des Teilnehmers k und die Beiträge aller anderen $K-1$ Teilnehmer bilden unter Zuführung des Störvektors \underline{n} den Empfangssignalvektor \underline{e} . Die sogenannte Systemmatrix \underline{A} wird durch die kombinierten Kanalimpulsantworten $\underline{b}^{(1)} \dots \underline{b}^{(K)}$, $k=1 \dots K$, aller K Teilnehmer bestimmt. Infolgedessen wird die Systemmatrix \underline{A} durch die CDMA-Codes $\underline{c}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, und die Kanalimpulsantworten $\underline{h}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, gebildet. Für den Empfangssignalvektor gilt somit:

$$\underline{e} = \underline{A} \underline{d} + \underline{n} \quad (1)$$

Ausgehend von der durch die Gleichung (1) und die Fig. 1 gestützten Beschreibung des Diskretzeit-Übertragungsmodells in Matrix-Vektor-Schreibweise für CDMA wird im folgenden anhand der Fig. 2 das im Empfänger zu lösende Detektionsproblem erläutert. Hierbei wird die allgemeinere Aufwärtsstreckensituation (Uplink), d. h. die Strecke von den Teilnehmern eines Funksystems zu einer Basisstation, betrachtet. Ziel der Datendetektion ist die Bestimmung eines Schätzwertes

$$\hat{\underline{d}} = (\hat{\underline{d}}_1, \hat{\underline{d}}_2, \dots, \hat{\underline{d}}_K)^T = (\hat{\underline{d}}^{(1)T}, \hat{\underline{d}}^{(2)T}, \dots, \hat{\underline{d}}^{(K)T})^T \quad (2)$$

des kombinierten Datenvektors \underline{d} aus dem Empfangssignalvektor \underline{e} , der durch den Störvektor \underline{n} gestört ist. Der wertdiskrete Schätzwert $\hat{\underline{d}}$ soll sich von \underline{d} in so wenigen Elementen wie möglich unterscheiden. Ebenso soll für jeden Teilnehmer k ein Schätzwert

$$\underline{\hat{d}}^{(k)} = (\underline{\hat{d}}_1^{(k)}, \underline{\hat{d}}_2^{(k)} \dots \underline{\hat{d}}_N^{(k)})^T \quad (3)$$

des Datenvektors $\underline{d}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, aus dem Empfangssignalvektor \underline{e} bestimmt werden. Das Problem der Datendetektion ist in Fig. 2 anhand eines Datendetektors 5 dargestellt. Die K Schätzwerte $\underline{\hat{d}}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, bilden den kombinierten Datenvektor $\underline{\hat{d}}$ nach Gleichung (2). Im CDMA-Fall ist das Datendetektionsproblem ein Detektionsproblem in einem Vielfacheingangs-Vielfachausgangs-System mit den K Eingängen $\underline{d}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, und den K Ausgängen $\underline{\hat{d}}^{(k)}$, $k=1 \dots K$.

Bei der Datendetektion benötigen die Algorithmen noch Nebeninformationen beim Empfänger:

- die CDMA-Codes $\underline{c}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, aller K Teilnehmer,
- die Kanalimpulsantworten $\underline{h}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, aller K Teilnehmer,
- das Datensymbolalphabet \underline{V}_d ,
- in einigen Fällen die Kovarianzmatrix $\underline{R}_d = E\{\underline{d} \underline{d}^T\}$ des kombinierten Datenvektors \underline{d} , und
- in einigen Fällen die Kovarianzmatrix \underline{R}_n des Störsignalvektors \underline{n} .

Die Kenntnis sowohl der CDMA-Codes $\underline{c}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, als auch der Kanalimpulsantworten $\underline{h}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, schließt die Kenntnis der Systemmatrix \underline{A} mit ein. Zur Ableitung des zweistufigen Datendetektions-Algorithmus nach der Erfindung wird angenommen, daß die Nebeninformationen beim Empfänger vollkommen bekannt sind. In einem wirklichen Übertragungssystem sind von einigen dieser Nebeninformationen nur Schätzwerte beim Empfänger vorhanden. Es kann in einem wirklichen System ein vollkommenes Wissen hinsichtlich des CDMA-Codes $\underline{c}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, des Datensymbolalphabets \underline{V}_d und der Kovarianzmatrix \underline{R}_d vorliegen. Die Kanalimpulsantworten $\underline{h}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, und die Kovarianzmatrix \underline{R}_n sind jedoch zu schätzen. In einem wirklichen System lassen sich die Kanalimpulsantworten z. B. dadurch schätzen, daß sogenannte Trainingssequenzen verwendet werden. Die empfangsseitige Kenntnis der Kanalimpulsantworten $\underline{h}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, oder von Schätzwerten davon erlaubt eine kohärente Detektion. In einem wirklichen System kann die Kovarianzmatrix \underline{R}_n entweder wiederholt geschätzt oder es kann eine Festgröße dafür angenommen werden.

Bei der Datendetektion nach der Erfindung wird davon ausgegangen, daß die Kanalschätzung und die eigentliche Datendetektion unabhängig voneinander ausgeführt werden. Die Schätzwerte der Kanalimpulsantworten $\underline{h}^{(k)}$, $k=1 \dots K$, werden als Eingangsgrößen des Datendetektors 5 nach Fig. 2 verwendet.

Im folgenden wird anhand eines CDMA-Systems ein Verfahren zur suboptimalen, Maximum Likelihood (ML)-basierten Datendetektion dargestellt, deren Algorithmus in zwei Stufen arbeitet. Das Hauptziel ML-basierter zweistufiger Datendetektionsalgorithmen ist die Verbesserung der durch einen linearen oder DF (Decision Feedback)-Algorithmus bestimmten Datensymbol-Schätzwerte mittels einer suboptimalen ML-basierten Nachverarbeitung, ohne daß ein solch hoher Rechenaufwand erforderlich wird, wie dies im Falle der optimalen MLSE (Maximum Likelihood Sequence Estimation) oder MLSSE (Maximum Likelihood Single Symbol Estimation) erforderlich ist. Zuerst wird im folgenden ein allgemeiner Zugang zu ML-basierten zweistufigen Datendetektionsalgorithmen bereit. Danach werden gemäß der Erfindung arbeitende spezifische ML-basierte zweistufige Datendetektionsalgorithmen dargestellt. Deren erste Stufe kann durch einen beliebigen linearen oder DF-Datendetektor gebildet werden. Alle diese ML-basierten zweistufigen Algorithmen werden auf der Grundlage des zeitdiskreten Übertragungsmodells abgeleitet und erlauben das Ausnutzen von Mehrwege-Diversity.

Wenn man von dem in Fig. 2 allgemein dargestellten Datendetektionsproblem ausgeht, läßt sich die Struktur des Datendetektors für den Fall eines ML-basierten zweistufigen Datendetektionsalgorithmus entsprechend der Darstellung in Fig. 3 angeben. In der in Fig. 2 abgebildeten Struktur sind K Ausgänge des Datendetektors 5 gezeigt. Der Einfachheit halber sind diese K Ausgänge in der in Fig. 3 dargestellten Struktur zu einem einzigen Ausgang kombiniert. Der Datendetektor besteht aus einer ersten Stufe 6, die ein Hilfsdetektor ist, der einen wertdiskreten Probeschätzwert $\underline{\hat{d}}_{AD}$ des kombinierten Datenvektors $\underline{\hat{d}}$ liefert. Der ersten Stufe 6 folgt eine zweite Stufe 7, die ein ML-basierter Nachdetektor ist, der den endgültigen Schätzwert $\underline{\hat{d}}_{PD}$ liefert. Dieses zweistufige Konzept ist, wie bereits in der Beschreibungseinleitung ausgeführt worden ist, an sich bekannt. Die den Hilfsdetektor bildende Stufe 6 kann ein beliebiger suboptimaler Datendetektor sein, z. B. einer der linearen Datendetektoren, die auf DMF (Decorrelating Matched Filter), ZF-BLE (Zero Forcing Block Linear Equalizer) oder MMSE-BLE (Minimum Mean Square Error Block Linear Equalizer) beruhen, oder einer der DF-Datendetektoren, die auf DMF-BDFE (DMF-Block Decision Feedback Equalizer), ZF-BDFE (ZF-Block Decision Feedback Equalizer) oder MMSE-BDFE (MMSE-Block Decision Feedback Equalizer) beruhen. Einzelheiten zu derartigen Datendetektoren enthält der Aufsatz von A. Klein, G. Kawas Kaleh, P. W. Baier: "Equalizers for Multi-User Detection in Code Division Multiple Access Mobile Radio Systems", Proceedings Vehicular Technology Conference, Stockholm, Juni 1994, Seiten 762 bis 766. Der von der Stufe 6 abgegebene wertdiskrete Schätzwert $\underline{\hat{d}}_{AD}$ wird als erster Probeschätzwert verwendet und der den Nachdetektor bildenden Stufe 7 zugeführt. Der Grundgedanke hinsichtlich der den Nachdetektor bildenden Stufe 7 besteht darin, dort einige oder alle Komponenten $\underline{\hat{d}}_{AD,j}$, $1 \leq j \leq KN$, (N = Anzahl der Datensymbole pro Datenfolge) des Probeschätzwertes $\underline{\hat{d}}_{AD}$ durch Anwendung eines ML-basierten Kriteriums zu prüfen. Zu diesem Zweck bestimmt die Stufe 7 ML-basierte Schätzwerte $\underline{\hat{d}}_{ML,j}$, $1 \leq j \leq KN$, der Komponenten j des kombinierten Datenvektors $\underline{\hat{d}}$, für den die Probeschätzwerte $\underline{\hat{d}}_{AD,j}$, $1 \leq j \leq KN$, zu prüfen sind. Diese ML-basierten Schätzwerte $\underline{\hat{d}}_{ML,j}$, $1 \leq j \leq KN$, werden mit den entsprechenden, durch die Stufe 6 ermittelten Probeschätzwerten $\underline{\hat{d}}_{AD,j}$, $1 \leq j \leq KN$, verglichen. Die Komponenten $\underline{\hat{d}}_{AD,j}$, $1 \leq j \leq KN$, des Probeschätzwertes $\underline{\hat{d}}_{AD}$, die sich von den entsprechenden ML-basierten Schätzwerten $\underline{\hat{d}}_{ML,j}$, $1 \leq j \leq KN$ unterscheiden, müssen geändert werden, d. h. sie werden durch die ML-basierten Schätzwerte $\underline{\hat{d}}_{ML,j}$, $1 \leq j \leq KN$, ersetzt. Der Schätzwert $\underline{\hat{d}}_{PD}$, der aus dem Schätzwert $\underline{\hat{d}}_{AD}$ aufgrund Ersetzens der

vorher erwähnten Komponenten \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j \leq KN$, durch die Komponenten \hat{d}_{MLj} , $1 \leq j \leq KN$, erzeugt wird, ist im allgemeinen im Vergleich zum Schätzwert \hat{d}_{AD} hinsichtlich Bit- und Symbolfehlerwahrscheinlichkeit verbessert.

Im folgenden werden verschiedene Kriterien zur Bestimmung eines ML-basierten Schätzwertes \hat{d}_{MLj} einer Komponente d_j , $1 \leq j \leq KN$, des kombinierten Datenvektors \underline{d} vorgestellt. Diese verschiedenen Kriterien führen zu verschiedenen Nachdetektortypen. Vor der Vorstellung verschiedener, zu suboptimalen ML-basierten Schätzwerten führender Kriterien wird auf das Kriterium zur Bestimmung des optimalen ML-basierten Schätzwertes \hat{d}_{MLj} einer Komponente d_j , $1 \leq j \leq KN$, des kombinierten Datenvektors \underline{d} eingegangen, das den Wahrscheinlichkeitsmaximierungsausdruck

$$\max_{\underline{d}, \underline{e}} P\{\underline{d}, |\underline{e}\}$$

enthält und dabei auf den optimalen MLSSE-Schätzwert \hat{d}_{MLSSEj} der Komponente d_j hinausläuft. In der die Nachdetektion bildenden Stufe 7 wird zur Bestimmung von \hat{d}_{PDj} der bei der Hilfsdetektion in der Stufe 6 ermittelte Schätzwert \hat{d}_{ADj} durch den entsprechenden optimalen Schätzwert $\hat{d}_{MLj} = \hat{d}_{MLSSEj}$, $1 \leq j \leq KN$, ersetzt, wenn die beiden Schätzwerte \hat{d}_{ADj} und \hat{d}_{MLj} nicht gleich sind. Wenn der MLSSE-Schätzwert $\hat{d}_{MLj} = \hat{d}_{MLSSEj}$, von der die Nachdetektion ausführenden Stufe 7 für alle Komponenten d_j , $1 \leq j \leq KN$, des kombinierten Datenvektors \underline{d} bestimmt und zum Ersetzen von \hat{d}_{ADj} benutzt ist, ergibt sich der optimale MLSSE-Schätzwert. In diesem Fall wird die Hilfsdetektion in der Stufe 6 unnötig und die Nachdetektion ist gleich der MLSSE-Schätzung, bei der bekanntlich die Berechnungskomplexität unrealistisch hoch ist. Die Erfindung hat es sich deswegen zum Ziel gesetzt, Kriterien zur Bestimmung ML-basierter Schätzwerte \hat{d}_{MLj} , $1 \leq j \leq KN$, in einer suboptimalen Weise und mit erheblich weniger Rechenaufwand zu finden. Die folgenden suboptimalen Varianten reduzierter Komplexität sind Gegenstand der Erfindung:

- Das Kriterium zur Bestimmung des optimalen ML-basierten Schätzwertes oder MLSSE-Schätzwertes $\hat{d}_{MLj} = \hat{d}_{MLSSEj}$, von d_j , $1 \leq j \leq KN$, wird nur einem ausgewählten Satz aller KN Datensymbole \underline{d}_j anstatt allen KN Datensymbolen \underline{d}_j , $1 \leq j \leq KN$, zugeführt. Dies führt dazu, daß nur ein ausgewählter Satz von Komponenten \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j \leq KN$, des Probeschätzwertes \hat{d}_{AD} geprüft wird und, wenn erforderlich, durch die Nachdetektion in der Stufe 7 geändert wird, wogegen der Rest unverändert bleibt.
- Anstelle des bekannten, zu optimalen ML-basierten Schätzwerten $\hat{d}_{MLj} = \hat{d}_{MLSSEj}$ der Datensymbole \underline{d}_j , $1 \leq j \leq KN$, führenden Kriteriums wird ein zu suboptimalen ML-basierten Schätzwerten \hat{d}_{MLj} führendes Kriterium angewandt. Solch ein zu suboptimalen ML-basierten Schätzwerten \hat{d}_{MLj} , $1 \leq j \leq KN$, führendes Kriterium ergibt sich, wenn der bereits erwähnte, die Wahrscheinlichkeitsmaximierung betreffende Ausdruck

$$\max_{\underline{d}, \underline{e}} P\{\underline{d}, |\underline{e}\}$$

durch eine Näherung ersetzt wird.

- Die beiden vorhergehend erwähnten Varianten werden kombiniert, d. h. ein zu einem suboptimalen ML-basierten Schätzwert \hat{d}_{MLj} , $1 \leq j \leq KN$, führendes Kriterium wird lediglich bei einem ausgewählten Satz aller KN Datensymbole \underline{d}_j , $1 \leq j \leq KN$, angewandt.

Im folgenden werden die erste und zweite Variante im einzelnen diskutiert. Die dritte Variante ergibt sich in klarer Weise aus der ersten und zweiten Variante.

Bezüglich der ersten Variante muß ein Kriterium zum Auswählen der in der Stufe 7 bei der Nachdetektion zu prüfenden und somit zu dem ausgewählten Satz der Komponenten gehörenden Komponenten \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j \leq KN$, vorgeschrieben werden. Im allgemeinen sollten die am wenigsten zuverlässigen Schätzwerte \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j \leq KN$, die bei der Hilfsdetektion in der Stufe 6 bestimmt wurden, zum für die Prüfung durch die Nachdetektions-Stufe 7 ausgewählten Satz gehören. Somit werden von allen anfallenden Schätzwerten \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j \leq KN$, diejenigen, die am wahrscheinlichsten falsch sind, geprüft und, wenn erforderlich, durch die Nachdetektions-Stufe 7 geändert. Mögliche Zuverlässigkeitsindikatoren sind beispielsweise der Wert der Energien $\|\hat{b}^{(k)}\|^2$ der kombinierten Kanalimpulsantworten $\hat{b}^{(k)}$, das Signal-Stör-Verhältnis γ_{ADj} , die Lage des wertkontinuierlichen Schätzwertes \hat{d}_{cADj} in der komplexen Ebene und die Wahrscheinlichkeit einer falschen Entscheidung oder eines Symbolfehlers. Alle diese Zuverlässigkeitsindikatoren lassen sich als Kriterium zur Auswahl derjenigen Komponenten \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j \leq KN$, benutzen, die zu dem zum Zwecke einer Prüfung durch die Nachdetektion ausgewählten Satz gehören. Abgesehen vom zusätzlichen Rechenaufwand, der zur Bestimmung derjenigen Schätzwerte \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j \leq KN$, die zum ausgewählten Satz gehören, erforderlich ist, wird die Rechenkomplexität der Nachdetektion im Vergleich zur Rechenkomplexität bei MLSSE um einen Prozentsatz verringert, der gleich dem Prozentsatz von Schätzwerten \hat{d}_{ADj} ist, die nicht zum ausgewählten Satz gehören.

Bezüglich der zweiten vorher erwähnten suboptimalen Variante zur Verringerung der Komplexität ist eine Annäherung des Ausdrucks

$$\max_{\underline{d}, \underline{e}} P\{\underline{d}, |\underline{e}\}$$

zu finden. Die erste Möglichkeit zur Bestimmung einer Annäherung kann für denjenigen Fall gefunden werden, bei dem die Größe M des Symbolalphabets $\underline{V}_d, \{\underline{v}_{d,1}, \underline{v}_{d,2} \dots \underline{v}_{d,M}\}$ größer als zwei ist. In diesem Fall ist eine Annäherung des Ausdrucks

$$\max_{\underline{d} \in \underline{V}_d} P\{\underline{d}_j | \underline{e}\}$$

gegeben, wenn anstelle des Maximums über alle $\underline{d}_j \in \underline{V}_d$ das Maximum nur über einen ausgewählten Satz aller $\underline{d}_j \in \underline{V}_d$ bestimmt wird. Neben dem Schätzwert \underline{d}_{ADj} könnten z.B. die nächsten Nachbarn von \underline{d}_{ADj} in der komplexen Ebene, die zu \underline{V}_d gehören, in den ausgewählten Satz mit eingeschlossen werden. Die erste Möglichkeit soll im folgenden nicht weiter betrachtet werden. Die zweite Möglichkeit zur Bestimmung einer Annäherung des Ausdrucks

$$\max_{\underline{d} \in \underline{V}_d} P\{\underline{d}_j | \underline{e}\}$$

ist gegeben, wenn die Wahrscheinlichkeit $P\{\underline{d}_j | \underline{e}\}$ durch eine Annäherung $P_a\{\underline{d}_j | \underline{e}\}$ ersetzt wird. Im folgenden wird in einem ersten Schritt die genaue Wahrscheinlichkeit $P\{\underline{d}_j | \underline{e}\}$ berechnet und aus diesem Ergebnis wird in einem zweiten Schritt eine Annäherung $P_a\{\underline{d}_j | \underline{e}\}$ abgeleitet werden. Die Wahrscheinlichkeit, daß die Komponente \underline{d}_j , die gleich einem der Elemente $\underline{v}_{d,m}$, $1 \leq m \leq M$, des Datensymbolalphabets \underline{V}_d ist, unter der Bedingung, daß \underline{e} empfangen wird, übertragen worden ist, lautet:

$$P\{\underline{d}_j | \underline{e}\} = P\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m} | \underline{e}\} = \sum_{\substack{\text{alle } \underline{d} \in \underline{V}_d^{KN} \\ \text{mit } \underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}}} P\{\underline{d} | \underline{e}\}. \quad (4)$$

Somit müssen zur Erlangung der Wahrscheinlichkeit $P\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m} | \underline{e}\}$, daß $\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}$ übertragen worden ist, die Wahrscheinlichkeiten $P\{\underline{d} | \underline{e}\}$ aller Vektoren \underline{d} , deren j -te Komponente \underline{d}_j gleich $\underline{v}_{d,m}$ ist, summiert werden. Entsprechend dem Bayes'-Theorem gilt:

$$P\{\underline{d} | \underline{e}\} = \frac{p(\underline{e} | \underline{d}) P\{\underline{d}\}}{p(\underline{e})} = \frac{p(\underline{e} | \underline{d}) P\{\underline{d}\}}{\sum_{\text{alle } \underline{d}' \in \underline{V}_d^{KN}} p(\underline{e} | \underline{d}') P\{\underline{d}'\}}. \quad (5)$$

Die Wahrscheinlichkeit $P\{\underline{d} | \underline{e}\}$ wird im folgenden berechnet, wobei einige vereinfachende Annahmen gemacht werden. Alle Vektoren $\underline{d}, \underline{d}' \in \underline{V}_d^{KN}$ werden als gleich wahrscheinlich angenommen, was ergibt:

$$P\{\underline{d} | \underline{e}\} = \frac{p(\underline{e} | \underline{d})}{\sum_{\text{alle } \underline{d}' \in \underline{V}_d^{KN}} p(\underline{e} | \underline{d}')}. \quad (6)$$

Zur Bestimmung der bedingten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(\underline{e} | \underline{d})$ wird der spezielle Fall \underline{R}_n (Kovarianzmatrix des Rauschens) gleich $\sigma^2 \underline{I}$ (σ^2 = Varianz des weißen Rauschens; \underline{I} = Einheitsmatrix) und \underline{R}_d (Kovarianzmatrix des kombinierten Datenvektors) gleich \underline{I} angenommen, was zu folgender Beziehung führt:

$$p(\underline{e} | \underline{d}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)^{NO+N-1}}} \exp\left(-\frac{\|\underline{e} - \underline{A}\underline{d}\|^2}{2\sigma^2}\right). \quad (7)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (7) und (6) in die Gleichung (4) liefert folgendes Resultat:

$$P\{\underline{d}_j|\underline{e}\} = P\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\} = \frac{\sum_{\substack{\text{alle } \underline{d} \in \mathbb{V}_d^{KN} \\ \text{mit } d_j = v_{d,m}}} e^{-D(\underline{d})}}{\sum_{\text{alle } \underline{d}' \in \mathbb{V}_d^{KN}} e^{-D(\underline{d}')}}, \text{ wobei } D(\underline{d}) = \frac{\|\underline{e} - \underline{A}\underline{d}\|^2}{2\sigma^2}. \quad (8)$$

Der optimale ML-basierte Schätzwert oder MLSSE-Schätzwert $\hat{\underline{d}}_{\text{MLSSE}j}$ von \underline{d}_j , $1 \leq j \leq KN$, ist gegeben durch

$$\hat{\underline{d}}_{\text{MLSSE}j} = \arg \max_{\substack{\underline{v}_{d,m} \in \mathbb{V}_d \\ \text{mit } d_j = v_{d,m}}} \sum_{\substack{\text{alle } \underline{d} \in \mathbb{V}_d^{KN} \\ \text{mit } d_j = v_{d,m}}} e^{-D(\underline{d})}, \quad (9)$$

da der Nenner im zweiten Term der Gleichung (8) der gleiche für alle $\underline{v}_{d,m}$ mit $\underline{v}_{d,m} \in \mathbb{V}_d$ ist.

Im folgenden werden, ausgehend von den Gleichungen (8) und (9), eine Annäherung $P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ von $P\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ und der resultierende suboptimale ML-basierte Schätzwert $\hat{\underline{d}}_{\text{ML}j}$, $1 \leq j \leq KN$, abgeleitet. Wie sich aus den Gleichungen (8) und (9) ersehen läßt, beruht die Berechnung von $P\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ und von $\hat{\underline{d}}_{\text{MLSSE}j}$ auf einer über alle Vektoren \underline{d} mit fester j -ten Komponente $d_j = v_{d,m}$ durchgeführten Summierung, während alle anderen $KN-1$ Komponenten $\underline{d}_{j'}$, $j' = 1 \dots KN$, $j' \neq j$, verändert werden. Eine Annäherung $P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ von $P\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ kann durch Veränderung nur eines Unter-Satzes der anderen $KN-1$ Komponenten $\underline{d}_{j'}$, $j' = 1 \dots KN$, $j' \neq j$, anstatt aller $KN-1$ Komponenten $\underline{d}_{j'}$ erreicht werden. Vorteilhaft wird der Satz Z_j definiert, der die Indizes aller Komponenten $\underline{d}_{j'}$, $j' = 1 \dots KN$, $j' \neq j$, enthält, die nicht verändert werden, d. h. die bei der Bestimmung von $P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ und somit bei der Prüfung des Probeschätzwertes $\hat{\underline{d}}_{\text{AD}j}$ fixiert sind. Für diesen Satz Z_j gilt

$$Z_j \subseteq \{1, 2, \dots, KN\} \setminus \{j\}, \quad 1 \leq M_{Z_j} \leq KN-1, \quad (10)$$

wobei M_{Z_j} die Größe des Satzes Z_j angibt. Der Satz Z_j und seine Größe M_{Z_j} hängen vom Index j der Komponente \underline{d}_j ab, für die $P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ bestimmt wird. Die Komponenten $\underline{d}_{j'}$, $j' \in Z_j$, die fixiert sind, werden gleich dem korrespondierenden wertdiskreten Schätzwert $\hat{\underline{d}}_{\text{AD}j}$ gelassen, der von der Hilfsdetektion in der Stufe 6 ermittelt wurde. Mit der Gleichung (10) ist die Annäherung von $P\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ gegeben durch:

$$P_a\{\underline{d}_j|\underline{e}\} = P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\} = \frac{\sum_{\substack{\text{alle } \underline{d} \in \mathbb{V}_d^{KN} \\ \text{mit } d_j = v_{d,m} \\ \text{und } \underline{d}_{j'} = \hat{\underline{d}}_{\text{AD}j'} \text{ für } j' \in Z_j}} e^{-D(\underline{d})}}{\sum_{\substack{\text{alle } \underline{d}' \in \mathbb{V}_d^{KN} \\ \text{mit } \underline{d}'_{j'} = \hat{\underline{d}}_{\text{AD}j'} \text{ für } j' \in Z_j}} e^{-D(\underline{d}')}}. \quad (11)$$

Gemäß der Gleichung (9) ist der resultierende suboptimale ML-basierte Schätzwert von \underline{d}_j mit der Gleichung (11)

$$\begin{aligned} \hat{\underline{d}}_{\text{ML}j} &= \arg \max_{\underline{v}_{d,m} \in \mathbb{V}_d} P_a\{\underline{d}_j|\underline{e}\} = \arg \max_{\underline{v}_{d,m} \in \mathbb{V}_d} P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\} \\ &= \arg \max_{\underline{v}_{d,m} \in \mathbb{V}_d} \sum_{\substack{\text{alle } \underline{d} \in \mathbb{V}_d^{KN} \\ \text{mit } d_j = v_{d,m} \\ \text{und } \underline{d}_{j'} = \hat{\underline{d}}_{\text{AD}j'} \text{ für } j' \in Z_j}} e^{-D(\underline{d})}. \end{aligned} \quad (12)$$

Zu den Kriterien zur Bestimmung des in Gleichung (10) angegebenen Satzes Z_j und somit der Komponenten $\underline{d}_{j'}$, $j' = 1 \dots KN$, $j' \neq j$, die bei der Bestimmung von $P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ fixiert sind, werden später Angaben gemacht. Die Tatsache, daß M_{Z_j} Komponenten $\underline{d}_{j'}$, $j' \in Z_j$, bei der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit $P_a\{\underline{d}_j|\underline{e}\}$ gemäß der Gleichung (11) und des suboptimalen ML-basierten Schätzwertes $\hat{\underline{d}}_{\text{ML}j}$ gemäß der Gleichung (12) fixiert sind, ergibt die Möglichkeit einer iterativen Prozedur bei der Nachdetektion, wie im folgenden noch ausgeführt wird. Während der Bestimmung der angenäherten Wahrscheinlichkeit $P_a\{\underline{d}_j = \underline{v}_{d,m}|\underline{e}\}$ zum Prüfen des Probeschätzwertes $\hat{\underline{d}}_{\text{AD}j}$ werden alle M_{Z_j} Komponenten $\underline{d}_{j'}$, $j' \in Z_j$, fest gleich $\hat{\underline{d}}_{\text{AD}j'}$ gesetzt. Somit wird der durch die Gleichung (12) angegebene Schätzwert $\hat{\underline{d}}_{\text{ML}j}$ durch Berechnung des durch Gleichung (12) gegebenen Maximums

bestimmt, d. h. der minimalen Fehlerwahrscheinlichkeit unter der Bedingung, daß die M_{z_j} Komponenten d_j , $j' \in Z_j$, gleich $\hat{d}_{ADj'}$ sind. Da alle KN Komponenten \hat{d}_{ADj} , $j = 1 \dots KN$, auf gleiche Weise geprüft werden, kann die Prüfung einer Komponente $d_j = \hat{d}_{ADj}$, $j' \in Z_j$, die während der Prüfung von \hat{d}_{ADj} fixiert gewesen ist, jedoch das Ergebnis liefern, daß diese Komponente $d_j = \hat{d}_{ADj}$ geändert werden muß. Wenn die Komponente $d_j = \hat{d}_{ADj}$ geändert wird, kann die Prüfung von \hat{d}_{ADj} einen anderen Wert liefern als vor der Änderung. Demzufolge bestehen Zwischenabhängigkeiten zwischen den Entscheidungen der verschiedenen Datensymbole d_j , $j = 1 \dots KN$. Die chronologische Ordnung, in der die Komponenten \hat{d}_{ADj} , $j = 1 \dots KN$, geprüft und, falls nötig, geändert werden, ist in Hinsicht auf den endgültigen Schätzwert \hat{d}_{PD} sowie die Ausführung der Nachdetektion und somit des ML-basierten zweistufigen Datendetektors entscheidend. Die vorher erwähnten Zwischenabhängigkeiten liegen bei der Bestimmung des optimalen MLSSE-Schätzwertes \hat{d}_{MLSSEj} entsprechend der Gleichung (9) nicht vor.

Nachfolgend wird der bei der Nachdetektion ausgeführte iterative Prozeß erläutert. Zunächst wird der erste Iterationsschritt beschrieben. Beim ersten Iterationsschritt werden die KN Schätzwerte \hat{d}_{MLj} , $j = 1 \dots KN$, gemäß der Gleichung (12) zur Prüfung von \hat{d}_{ADj} , $j = 1 \dots KN$, bestimmt. Für jedes j , $j = 1 \dots KN$ werden der Schätzwert \hat{d}_{MLj} und der Probeschätzwert \hat{d}_{ADj} verglichen. Als ein Ergebnis dieses Vergleichs lassen sich drei verschiedene Fälle unterscheiden:

— Im ersten Fall gilt $\hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}$ für keinen Wert von j , $j = 1 \dots KN$. In diesem Fall muß keiner der Schätzwerte \hat{d}_{ADj} der Hilfsdetektion geändert werden und der Schätzwert der Nachdetektion ist gleich dem Schätzwert der Hilfsdetektion, d. h. es gilt:

$$\hat{d}_{AD} = \hat{d}_{PD} \quad (13)$$

In diesem Fall bringt die Nachdetektion keine Verbesserung und es müssen keine weiteren Iterationsschritte ausgeführt werden.

— Im zweiten Fall gilt $\hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}$ für genau einen Wert von j , $1 \leq j \leq KN$. In diesem Fall wird dieser eine Schätzwert \hat{d}_{ADj} mit $\hat{d}_{ADj} \neq \hat{d}_{MLj}$ ersetzt durch \hat{d}_{MLj} , so daß sich

$$\hat{d}_{PDj} = \begin{cases} \hat{d}_{MLj} & \text{für den einen Wert von } j \text{ mit } \hat{d}_{ADj} \neq \hat{d}_{MLj}, \\ \hat{d}_{ADj} & \text{sonstige, } j = 1 \dots KN, \end{cases} \quad (14)$$

ergibt. In diesem Fall kann ein weiterer Iterationsschritt durch Setzen von \hat{d}_{AD} gleich \hat{d}_{PD} gemäß der Gleichung (14), d. h. durch Verwendung des Schätzwertes \hat{d}_{PD} der Nachdetektion als neuer Probeschätzwert \hat{d}_{AD} , und Ausführung derselben Operationen, die im Zusammenhang mit dem ersten Iterationsschritt erläutert wurden, ausgeführt werden. Aufgrund der vorher erwähnten Zwischenabhängigkeiten müssen beim nächsten Iterationsschritt eventuell eine oder mehrere Komponenten \hat{d}_{ADj} , $1 \leq j' \leq KN$ geändert werden.

— Im dritten Fall gilt $\hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}$ für mehr als einen Wert von j , $1 \leq j \leq KN$. In diesem Fall enthält der Satz $\{j | \hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}, 1 \leq j \leq KN\}$ mehr als ein Element. Aufgrund der vorher erwähnten Zwischenabhängigkeiten ist es ratsam, lediglich einen Unter-Satz der Schätzwerte \hat{d}_{ADj} im ersten Schritt zu ändern. Die Indizes dieser Schätzwerte sind in einem mit T bezeichneten Unter-Satz des Satzes $\{j | \hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}, 1 \leq j \leq KN\}$ enthalten. Für den Satz T gilt

$$T \subseteq \{j | \hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}, 1 \leq j \leq KN\}, 1 \leq M_T \leq M_{Tmax} \quad (15)$$

wobei M_T die Größe des Satzes T und M_{Tmax} die Größe des Satzes $\{j | \hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}, 1 \leq j \leq KN\}$, bezeichnet. Zu den Kriterien für die Bestimmung des in der Gleichung (15) angegebenen Satzes und somit des untergeordneten Satzes der M_T Schätzwerte \hat{d}_{ADj} , die beim ersten Iterationsschritt geändert werden, werden später Angaben gemacht. Die M_T Schätzwerte \hat{d}_{ADj} mit dem Index $j \in T$ werden durch \hat{d}_{MLj} ersetzt, so daß sich

$$\hat{d}_{PDj} = \begin{cases} \hat{d}_{MLj} & \text{für } j \in T, \\ \hat{d}_{ADj} & \text{sonstige, } j = 1 \dots KN \end{cases} \quad (16)$$

ergibt. Ein weiterer Iterationsschritt kann durch Setzen von \hat{d}_{AD} gleich \hat{d}_{PD} gemäß Gleichung (16) und Durchführung der gleichen Operationen, wie sie im Zusammenhang mit dem ersten Iterationsschritt erläutert worden sind, ausgeführt werden. Aufgrund der vorher erwähnten Zwischenabhängigkeiten kann es erforderlich werden, beim nächsten Iterationsschritt eine oder mehrere Komponenten \hat{d}_{ADj} mit $j \in T$ oder auch mit $j \in T$ mit T des ersten Iterationsschritts zu ändern. Darüber hinaus kann aufgrund der Zwischenabhängigkeiten eine Fehlerfortpflanzung auftreten.

Wenn nach einem oder mehreren Iterationsschritten der zuerst erwähnte Fall auftritt, müssen keine weiteren

Iterationsschritte mehr ausgeführt werden und der iterative Algorithmus für die Nachdetektion konvergiert. Abhängig vom Kriterium, wie T, vgl. Gleichung (15), gewählt ist, konvergiert der iterative Algorithmus für die Nachdetektion nicht notwendigerweise. Wenn Konvergenz nicht gewährleistet ist, läßt sich die Iteration anhalten, wenn der beim aktuellen Iterationsschritt ermittelte Schätzwert \hat{d}_{PD} gleich dem bei einem der vorhergehenden Iterationsschritte ermittelten Schätzwert \hat{d}_{PD} ist. Außerdem ist es zur Verringerung der Anzahl der Iterationsschritte und somit der Rechenkomplexität möglich, eine feste Anzahl von maximal auszuführenden Iterationsschritten oder einen festen Wert M_{Tmax} , vgl. Gleichung (15), vorzuschreiben, die bzw. der überschritten werden muß, damit ein weiterer Iterationsschritt zugelassen wird.

Wie vorstehend ausgeführt wurde, sind die Auswahl des in der Gleichung (10) angegebenen Satzes Z_j und die Wahl des in der Gleichung (15) angegebenen Satzes T wichtige Merkmale der Nachdetektion. Im folgenden werden verschiedene Kriterien für die Wahl sowohl von Z_j als auch von T dargelegt. Die folgenden Kriterien zur Auswahl des Satzes Z_j sind denkbar:

- Der Satz Z_j wird so gewählt, daß die Komponenten $d_j, j' = 1 \leq j' \leq KN, j' \neq j, j' \in Z_j$, die bei der Bestimmung von $P_a[d_j = \hat{v}_{d,m}|e]$ gemäß Gleichung (11) fixiert sind, diejenigen sind, die am zuverlässigsten sind. Verschiedene mögliche Zuverlässigkeitsindikatoren sind bereits vorher vorgestellt worden. Der geeignetste Zuverlässigkeitsindikator ist hierbei die in der Gleichung (11) angegebene Wahrscheinlichkeit $P_a[d_j = \hat{v}_{d,m}|e]$.
- Der Satz Z_j wird so gewählt, daß die Komponenten $d_j, j' = 1 \leq j' \leq KN, j' \neq j, j' \in Z_j$, diejenigen sind, die den geringsten, durch Intersymbolinterferenzen (ISI) und Vielfachzugriffsinterferenzen (MAI) entstehenden Einfluß auf den Schätzwert \hat{d}_{MLj} haben.
- Der Satz Z_j wird gleich $\{1, 2 \dots KN\} \setminus \{j\}$ gewählt, d. h. alle Komponenten $d_j, j' = 1 \dots KN, j' \neq j$, werden fixiert und nur die j-te Komponente d_j nimmt die abweichenden Werte $\hat{v}_{d,m}, m = 1 \dots M$, an.

Folgende Kriterien sind beispielsweise zur Wahl des Satzes T denkbar:

- Der Satz T wird so gewählt, daß alle Schätzwerte mit $\hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}, 1 \leq j \leq KN$ beim gleichen Iterationsschritt geändert werden. In diesem Fall wird der Satz T, vgl. Gleichung (15)

$$T = \{j | \hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}, 1 \leq j \leq KN\} \quad (17)$$

In diesem Fall konvergiert der iterative Algorithmus allerdings nicht notwendigerweise.

- Der Satz T wird so gewählt, daß nicht mehr als ein Schätzwert \hat{d}_{ADj} bei jedem Iterationsschritt geändert wird. Der eine zu ändernde Schätzwert \hat{d}_{ADj} sollte der zuverlässigste aller Schätzwerte mit $\hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}, 1 \leq j \leq KN$, sein, um den Degradationseffekt der Fehlerfortpflanzung zu vermindern. Als ein Zuverlässigkeitsindikator läßt sich z. B. die in der Gleichung (15) angegebene Wahrscheinlichkeit $P_a[d_j = \hat{d}_{MLj}|e]$ nehmen. In diesem Fall wird der in der Gleichung (15) angegebene Satz T

$$T = \left\{ j = \arg \max_{j=1 \dots KN \text{ mit } \hat{d}_{MLj} \neq \hat{d}_{ADj}} P_a \left\{ d_j = \hat{d}_{MLj} | e \right\} \right\} \quad (18)$$

mit \hat{d}_{MLj} gemäß Gleichung (16) und der in der Gleichung (15) definierten angenäherten Wahrscheinlichkeit $P_a[d_j = \hat{d}_{MLj}|e]$.

In diesem Fall läßt sich eine Konvergenz des iterativen Algorithmus unter gewissen Bedingungen erreichen, wie später noch im einzelnen aufgezeigt werden wird.

Im folgenden wird die Rechenkomplexität des ML-basierten zweistufigen Datendetektionsalgorithmus untersucht. Die Ausführung des ML-basierten zweistufigen Datendetektionsalgorithmus erfordert sowohl die Ausführung der Hilfsdetektion als auch der Nachdetektion. Die Rechenkomplexität für die Ausführung der Hilfsdetektion wird hier nicht behandelt. Die Rechenkomplexität der Nachdetektion soll für denjenigen Fall untersucht werden, daß \hat{d}_{MLj} gemäß der Gleichung (12) auf der Grundlage der durch die Gleichung (11) angegebenen angenäherten Wahrscheinlichkeit $P_a[d_j = \hat{v}_{d,m}|e]$ benutzt wird. Der für die Nachdetektion erforderliche Rechenaufwand hängt von der Wahl der Sätze Z_j , vgl. Gleichung (10), und T, vgl. Gleichung (15), und von der Anzahl der vorzunehmenden Iterationsschritte ab. Insbesondere mit zunehmender Größe M_{Zj} des Satzes Z_j wird die Rechenkomplexität exponentiell verringert, vgl. Gleichung (12). Im folgenden werden zwei spezifische vorteilhafte Nachdetektionsmöglichkeiten vorgestellt, die beide den Satz Z_j gleich $\{1, 2, \dots, KN\} \setminus \{j\}$ maximal möglicher Größe M_{Zj} gleich $KN-1$ benutzen, was zu einer minimalen rechnerischen Komplexität führt. Die beiden spezifischen Nachdetektionen unterscheiden sich bezüglich der Wahl des Satzes T.

Zuerst wird ein ML-basierter zweistufiger Detektor mit paralleler Nachdetektion abgeleitet, wobei vom vorher diskutierten allgemeinen Ansatz ML-basierter zweistufiger Datendetektionsalgorithmen ausgegangen wird. Die Hilfsdetektion kann dabei jede beliebige geeignete lineare oder DF(Decision Feedback)-Detektion sein. Im folgenden wird die parallele Nachdetektion im einzelnen erläutert.

Die parallele Nachdetektion benutzt ein Kriterium gemäß der Gleichung (11), das zu suboptimalen ML-basierten Schätzwerten, wie sie in der Gleichung (12) angegeben sind, führt und allen KN Datensymbolen $d_j, j = 1 \dots KN$ zugeführt wird. Demzufolge gehört die parallele Nachdetektion zur zweiten vorher vorgestellten suboptimalen Variante. Die parallele Nachdetektion benutzt den Satz

$$Z_{\text{ppd}_j} = \{1, 2, \dots, KN\} \setminus \{j\}, \quad M_{\text{ppd}_j} = KN - 1, \quad (19)$$

5 vgl. Gleichung (10), d. h. alle Komponenten $d_j, j' = 1 \dots KN, j \neq j'$, sind bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit $P_{\text{pPD}_2}[d_j = v_{d,m}|e]$ gemäß Gleichung (11) fixiert. Mit der Gleichung (19) und mit

$$10 \quad \bar{d}^{n,j} = (\bar{d}_1^{n,j}, \bar{d}_2^{n,j}, \dots, \bar{d}_{KN}^{n,j})^T, \quad \text{wobei} \quad \bar{d}_j^{n,j} = v_{d,m} \quad \text{und} \quad \bar{d}_{j'}^{n,j} = \hat{d}_{\text{AD},j'} \quad \text{für} \quad j' \in Z_{\text{ppd}_j} \quad (20)$$

wird

$$15 \quad P_{\text{pPD}_2}\{d_j|e\} = P_{\text{pPD}_2}\{d_j = v_{d,m}|e\} \\ = \frac{e^{-D(\bar{d}^{n,j})}}{\sum_{\substack{\text{alle } d' \in V_d \\ \text{mit } d_{j'} = \hat{d}_{\text{AD},j'} \text{ für } j' \in Z_{\text{ppd}_j}}} e^{-D(d')}} = \frac{1}{1 + \sum_{\substack{\text{alle } d' \in V_d \\ \text{mit } d_{j'} = v_{d,m} \\ \text{und } d_{j'} = \hat{d}_{\text{AD},j'} \text{ für } j' \in Z_{\text{ppd}_j}}} e^{D(\bar{d}^{n,j}) - D(d')}} \cdot (21)$$

25 Der sich ergebende suboptimale ML-basierte Schätzwert von d_j gemäß der Gleichung (12) wird

$$30 \quad \hat{d}_{\text{ML-ppd}_j} = \arg \max_{d_j \in V_d} P_{\text{pPD}_2}\{d_j|e\} = \arg \min_{\substack{d_j^{n,j} = v_{d,m} \in V_d}} \|e - A \bar{d}^{n,j}\|^2 \\ = \arg \max_{\substack{d_j^{n,j} = v_{d,m} \in V_d}} \left(2 \operatorname{Re} \left\{ \bar{d}^{n,j*T} A^T e \right\} - \left\{ \bar{d}^{n,j*T} A^T A \bar{d}^{n,j} \right\} \right). \quad (22)$$

Wie aus der Gleichung (22) ersehen werden kann, wandelt sich das MLSSE-basierte Kriterium gemäß der Gleichung (12) für den Satz Z_{ppd_j} , vgl. Gleichung (19), der maximale Größe M_{ppd_j} gleich $KN - 1$ hat, in ein MLSE-basiertes Kriterium um. Zur Ermittlung der Differenz $D(\bar{d}^{n,j}) - D(d')$ in der Gleichung (21), vgl. Gleichung (8), und zur Bestimmung des Minimums von $\|e - A \bar{d}^{n,j}\|^2$ in Gleichung (22) ist es nicht notwendig, alle Elemente $|e_i - [A \bar{d}^{n,j}]_i|^2, i = 1 \dots NQ + W - 1$, zu berechnen und sie zu summieren. Anstelle davon reicht es aus, nur die relevanten Teile, d. h. jene Elemente, die von $\bar{d}^{n,j}$ beeinflusst sind, zu berechnen, da alle anderen Elemente konstant sind, unabhängig von der Wahl von $\bar{d}^{n,j} \in V_d$. Lediglich eine Anzahl von $Q + W - 1$ von Elementen wird von $\bar{d}^{n,j}$ beeinflusst. Dies bedeutet, daß es ausreicht, nur jene Teile der Terme $\bar{d}^{n,j*T} A^T e$ und $\bar{d}^{n,j*T} A^T A \bar{d}^{n,j}$ in Gleichung (22) zu berechnen, die von $\bar{d}^{n,j}$ aufgrund von Intersymbolinterferenzen (ISI) und Vielfachzugriffsinterferenzen (MAI) beeinflusst werden.

Bei der parallelen Nachdetektion wird ein iterativer Prozeß ausgeführt. Bei jedem Iterationsschritt werden die durch die Gleichung (22) gegebenen KN Schätzwerte $\hat{d}_{\text{ML-ppd}_j}$ bestimmt und mit den entsprechenden Probeschätzwerten $\hat{d}_{\text{AD},j}$ verglichen. In den vorher erwähnten ersten beiden Fällen, bei denen für keinen oder genau einen Wert von $j, 1 \leq j \leq KN, \hat{d}_{\text{ML-ppd}_j} \neq \hat{d}_{\text{AD},j}$ gilt, ist die Vorgehensweise bereits beschrieben worden, und der Schätzwert der parallelen Nachdetektion ergibt sich gemäß Gleichung (13) bzw. (14). Im dritten vorher angegebenen Fall, bei dem für mehr als einem Wert von $j, 1 \leq j \leq KN, \hat{d}_{\text{ML-ppd}_j} \neq \hat{d}_{\text{AD},j}$ gilt, wird genau ein Probeschätzwert $\hat{d}_{\text{AD},j}$ geändert, d. h. beim aktuellen Iterationsschritt durch $\hat{d}_{\text{ML-ppd}_j}$ ersetzt. Der Index dieses einen Schätzwertes ist das Element des durch die Gleichung (18) angegebenen Satzes T mit der durch Gleichung (21) gegebenen angenäherten Wahrscheinlichkeit $P_{\text{pPD}_2}[d_j = \hat{d}_{\text{ML-ppd}_j}|e]$, um den Degradationseffekt der Fehlerausbreitung zu verringern. Aus der Gleichung (21) läßt sich ersehen, daß $P_{\text{pPD}_2}[d_j = \hat{d}_{\text{ML-ppd}_j}|e]$ um so größer ist, je kleiner der quadratische Euklidische Abstand $D(\bar{d}_{\text{ML-ppd}})$ in Hinsicht auf die Entscheidung $\hat{d}_{\text{ML-ppd}}$ und je größer der quadratische Euklidische Abstand $D(d'), d' \neq \hat{d}_{\text{ML-ppd}}$, bezüglich der anderen $M - 1$ Vektoren ist, auf die nicht entschieden wurde. Der Schätzwert der parallelen Nachdetektion ist gemäß der Gleichung (16) gegeben. Ein weiterer Iterationsschritt wird durch Setzen des Probeschätzwertes \hat{d}_{AD} gleich \hat{d}_{ppd} ausgeführt, so daß dann wiederum die vorher erläuterten Operationen vorgenommen werden. Die Iteration wird so lange fortgesetzt, bis der Algorithmus für die Nachdetektion konvergiert. Konvergenz ist gewährleistet, da bei jedem Iterationsschritt nicht mehr als ein Probeschätzwert $\hat{d}_{\text{AD},j}$ geändert wird und $\|e - A \hat{d}_{\text{ppd}}\|^2 < \|e - A \hat{d}_{\text{AD}}\|^2$, vgl. Gleichung (22). Somit wird ein weiterer Iterationsschritt nur durchgeführt, wenn er zu einer Abnahme des quadratischen Euklidischen Abstandes $\|e - A \hat{d}_{\text{ppd}}\|^2$ führt. Demzufolge kann ein Schätzwert \hat{d}_{ppd} niemals gleich einem bei einem vorhergehenden Iterationsschritt ermittelten Schätzwert sein.

Die Operationen der parallelen Nachdetektion bei einem Iterationsschritt sind in Fig. 4 dargestellt. Der Fall K

gleich 2 und N gleich 3 und das Datensymbolalphabet \underline{V}_d gleich $\{v_{d1}=1, v_{d2}=j, v_{d3}=-1, v_{d4}=-j\}$ der Größe M gleich 4 wird angenommen. In Fig. 4 sind die wertdiskreten Probeschätzwerte \hat{d}_{ADj} , $j=1 \dots KN$, gezeigt, die durch die Hilfsdetektion für alle N Datensymbole aller K Teilnehmer ermittelt worden sind. Als nächstes wird die Prüfung des Probeschätzwertes \hat{d}_{AD3} beispielhaft dargestellt. Der Probeschätzwert \hat{d}_{AD3} wird durch alle vier möglichen Werte v_{d1} , v_{d2} , v_{d3} und v_{d4} ersetzt, während alle Komponenten \hat{d}_{ADj} , $j'=1 \dots KN$, $j' \neq 3$, fixiert sind. Für jeden der vier resultierenden Vektoren $\hat{\underline{d}}_1^3$, $\hat{\underline{d}}_2^3$, $\hat{\underline{d}}_3^3$ und $\hat{\underline{d}}_4^3$, vgl. Gleichung (20), wird jeweils der quadratische Euklidische Abstand Δ_3^1 , Δ_3^2 , Δ_3^3 und Δ_3^4 , mit Δ_j^m gleich $\|\underline{e}-\underline{A} \hat{\underline{d}}_j^m\|^2$ nach der Gleichung (22) berechnet. Alle KNM Werte von Δ_j^m werden auf gleiche Weise berechnet, wenn das j-te Datensymbol gleich v_{dm} , $j=1 \dots KN$, $m=1 \dots M$ gesetzt wird. Dann wird für jedes j, $j=1 \dots KN$ der minimale der vier Werte Δ_j^m , $m=1 \dots M$ ermittelt. Beispielsweise ist für j gleich 3 der minimale Wert gleich Δ_3^2 . Die durch die Gleichung (22) gegebenen Schätzwerte $\hat{d}_{ML-PPDj}$, die auf dem Minimum von Δ_j^m , $m=1 \dots M$, beruhen, werden mit dem Probeschätzwert \hat{d}_{ADj} der Hilfsdetektion verglichen. Im Beispiel nach Fig. 4 sind $\hat{d}_{ML-PPDj}$ und \hat{d}_{ADj} gleich für j gleich 1, 2, 4 und 6 und sie sind nicht gleich für j gleich 3 und 5. Demzufolge sind sowohl \hat{d}_{AD3} als auch \hat{d}_{AD5} zu ändernde Kandidaten. Um zu entscheiden, welcher der beiden Schätzwerte geändert werden soll, wird entsprechend der Gleichung (21) die Wahrscheinlichkeit $P_{PPDa}[d_j] = \hat{d}_{ML-PPDj} |e|$ für j gleich 3 und j gleich 5 berechnet. Der zur maximalen Wahrscheinlichkeit führende Schätzwert $\hat{d}_{ML-PPDj}$, d. h. derjenige, der am wahrscheinlichsten korrekt ist, wird ermittelt. Dieser Schätzwert, der im Beispiel von Fig. 4 $\hat{d}_{ML-PPD5}$ ist, wird dazu benutzt, \hat{d}_{AD5} in \hat{d}_{AD} zu ersetzen. Der sich ergebende Vektor mit modifizierter 5-ter Komponente wird als neuer Eingangsvektor \hat{d}_{AD} für den nächsten Iterationsschritt verwendet. Die Iteration wird so lange fortgesetzt, bis keine weitere Vektorkomponente mehr modifiziert werden muß. Aus Fig. 4 ist ersichtlich, warum die Nachdetektion als parallele Nachdetektion bezeichnet wird. Alle KN Schätzwerte \hat{d}_{ADj} , $j=1 \dots KN$, werden parallel geprüft, indem die KNM quadratischen Euklidischen Abstände Δ_j^m , $j=1 \dots KN$, $m=1 \dots M$, parallel berechnet werden und dann bestimmt wird, welcher der Schätzwerte \hat{d}_{ADj} , $j=1 \dots KN$, geändert wird.

Der für die parallele Nachdetektion erforderliche Rechenaufwand soll nun untersucht werden. Für die parallele Nachdetektion muß pro Iterationsschritt eine Anzahl KNM von relevanten Teilen der quadratischen Euklidischen Abstände $\|\underline{e}-\underline{A} \hat{\underline{d}}_j^m\|^2$ gemäß Gleichung (22) berechnet werden. Demzufolge hängt die Rechenkomplexität von der Größe M des Datensymbolalphabets $\underline{V}_d = \{v_{d1}, v_{d2} \dots v_{dM}\}$ ab. Der für die Berechnung jeder dieser KNM Wahrscheinlichkeiten erforderliche Aufwand wird aufgrund der Tatsache minimiert, daß der Satz Z_j gleich $\{1, 2, \dots, KN\} \setminus \{j\}$ maximal möglicher Größe M_{Z_j} gleich $KN-1$ benutzt wird. Nach Ermittlung der Schätzwerte $\hat{d}_{ML-PPDj}$, $j=1 \dots KN$, durch die in der Gleichung (22) angegebene Minimierungsoperation und deren Vergleich mit \hat{d}_{ADj} ist für diejenigen Schätzwerte mit $\hat{d}_{ML-PPDj} \neq \hat{d}_{ADj}$ die in Gleichung (21) angegebene Wahrscheinlichkeit $P_{PPDa}[d_j] = \hat{d}_{ML-PPDj} |e|$ zu berechnen. Aufgrund der Tatsache, daß bei jedem Iterationsschritt nur der eine Schätzwert mit der maximalen Wahrscheinlichkeit $P_{PPDa}[d_j] = \hat{d}_{ML-PPDj} |e|$ geändert wird, und die Iteration fortgesetzt wird, bis Konvergenz erreicht wird, ist die Anzahl der auszuführenden Iterationsschritte nicht festgelegt, sondern hängt vom aktuellen Probeschätzwert \hat{d}_{AD} ab. Es ist eine Lösung zwischen einer geringen Komplexität aufweisenden, unzuverlässigen Datensymbole liefernden Hilfsdetektion, die somit eine große Anzahl von Iterationsschritten bei der Nachdetektion erfordert, auf der einen Seite und einer höheren Komplexität aufweisenden, zuverlässigeren Schätzwerte liefernden Hilfsdetektion, die eine geringere Anzahl von Iterationsschritten bei der Nachdetektion benötigt, auf der anderen Seite zu finden.

Im folgenden wird eine Nachdetektionsmöglichkeit diskutiert, die im allgemeinen eine kleinere Anzahl von Iterationsschritten erfordert und zu einer Ausführung führt, die nur geringfügig schlechter als die vorstehend vorgestellte parallele Nachdetektion ist.

Bei dieser Nachdetektionsmöglichkeit handelt es sich um einen ML-basierten zweistufigen Detektor mit aufeinanderfolgender (sukzessiver, serieller) Nachdetektion. Zur im folgenden ausgeführten Ableitung des im folgenden als serieller Nachdetektor bezeichneten Detektors wird von dem bereits erläuterten allgemeinen Ansatz für ML-basierte zweistufige Datendetektionsalgorithmen und von der parallelen Nachdetektion ausgegangen. Wie für die parallele Nachdetektion kann die Hilfsdetektion auf der Grundlage eines beliebigen geeigneten linearen oder DF(Decision Feedback)-Detektors ablaufen. Im folgenden wird die als serielle Nachdetektion bezeichnete Nachdetektionsmöglichkeit im einzelnen beschrieben.

Wie die parallele Nachdetektion benutzt die serielle Nachdetektion den Satz Z_{PDj} gleich dem durch die Gleichung (19) gegebenen Satz Z_{PPDj} maximaler Größe M_{SPDj} gleich $KN-1$ und die Wahrscheinlichkeit $P_{SPDa}[d_j|e]$ gleich der durch Gleichung (21) gegebenen Wahrscheinlichkeit $P_{PPDa}[d_j|e]$, was zum suboptimalen ML-basierten Schätzwert $\hat{d}_{ML-SPDj} = \hat{d}_{ML-PPDj}$ führt, wie er durch die Gleichung (22) angegeben wird. Darüber hinaus wird bei der seriellen genauso wie bei der parallelen Nachdetektion ein iterativer Prozeß ausgeführt. Jedoch werden bei der seriellen Nachdetektion die KN Schätzwerte \hat{d}_{ADj} , $j=1 \dots KN$, aufeinanderfolgend geprüft und nicht parallel. Bei jedem Iterationsschritt werden folgende Operationen ausgeführt. Der Schätzwert $\hat{d}_{ML-SPD1}$ gemäß Gleichung (22) wird ermittelt und verglichen mit dem korrespondierenden Schätzwert \hat{d}_{AD1} . Wenn $\hat{d}_{AD1} \neq \hat{d}_{ML-SPD1}$, dann wird \hat{d}_{AD1} unmittelbar durch $\hat{d}_{ML-SPD1}$ ersetzt, was zum Schätzwert \hat{d}_{SPD1} und einem neuen Probeschätzwert \hat{d}_{AD} führt. Auf der Grundlage dieses neuen Probeschätzwertes \hat{d}_{AD} wird der nächste Schätzwert $\hat{d}_{ML-SPD2}$ gemäß Gleichung (22) bestimmt, wird mit \hat{d}_{AD2} verglichen und, sofern $\hat{d}_{AD2} \neq \hat{d}_{ML-SPD2}$, wird der Probeschätzwert \hat{d}_{AD2} unmittelbar durch \hat{d}_{SPD2} ersetzt, usw. Diese Operationen werden für alle KN Schätzwerte \hat{d}_{ADj} , $j=1 \dots KN$, ausgeführt. Um den Degradationseffekt der Fehlerfortpflanzung zu verringern, wird eine Kanalsortierung vor Beginn der Nachdetektion eingesetzt. Wenn wenigstens für einen Wert von j, $1 \leq j \leq KN$, $\hat{d}_{ML-SPDj} \neq \hat{d}_{ADj}$ gültig gewesen ist, wird ein weiterer Iterationsschritt ausgeführt. Die Iteration wird so lange fortgesetzt, bis der Algorithmus für die serielle Nachdetektion konvergiert. Der abschließende Schätzwert \hat{d}_{SPD} der seriellen Nachdetektion ergibt sich, nachdem der letzte Iterationsschritt ausgeführt worden ist. Die Konvergenz ist sichergestellt, da ein Schätzwert \hat{d}_{ADj} nur geändert wird, wenn $\|\underline{e}-\underline{A} \hat{\underline{d}}_{SPD}\|^2 < \|\underline{e}-\underline{A} \hat{\underline{d}}_{AD}\|^2$, vgl. Gleichung (22), gilt. Somit wird ein Probeschätzwert \hat{d}_{ADj} nur geändert, wenn

er zu einer Abnahme des quadratischen Euklidischen Abstandes $\|e - A \hat{d}_{SPD}\|^2$ führt. Demzufolge kann ein Schätzwert \hat{d}_{SPD} niemals gleich einem vorhergehend ermittelten Schätzwert sein.

Die Operationen der seriellen Nachdetektion in einem Iterationsschritt lassen sich durch eine geringfügige Modifikation der für die parallele Nachdetektion geltenden Fig. 4 darstellen. Die Prüfung eines Schätzwertes ist, wie in Fig. 4 gezeigt ist, für das Beispiel von \hat{d}_{AD3} gleichermaßen für die serielle Nachdetektion gültig. Wie im Falle der parallelen Nachdetektion wird für jeden der vier resultierenden Vektoren $\hat{d}_{13}^1, \hat{d}_{13}^2, \hat{d}_{13}^3$ und \hat{d}_{13}^4 der quadratische Euklidische Abstand $\Delta_3^1, \Delta_3^2, \Delta_3^3$ bzw. Δ_3^4 berechnet, vgl. Fig. 4. Im Gegensatz zur parallelen Nachdetektion werden die anderen KNM-M Werte von Δ_j^m mit $j = 1 \dots KN, j \neq 3, m = 1 \dots M$, nicht gleichzeitig berechnet, wenn der Probeschätzwert \hat{d}_{AD3} geprüft wird. Für j gleich 3 wird der minimale der vier Werte $\Delta_3^m, m = 1 \dots M$, ermittelt. Der durch die Gleichung (22) gegebene, auf dem minimalen Wert der Werte $\Delta_3^m, m = 1 \dots M$, beruhende Schätzwert $\hat{d}_{ML-SPD3}$ wird mit dem Probeschätzwert \hat{d}_{AD3} der Hilfsdetektion verglichen. Wenn $\hat{d}_{ML-SPD3} \neq \hat{d}_{AD3}$, dann wird der Probeschätzwert \hat{d}_{AD3} unmittelbar durch $\hat{d}_{ML-SPD3}$ ersetzt, was zu einem neuen Probeschätzwert \hat{d}_{AD} führt. Unter Zugrundelegung des Probeschätzwertes \hat{d}_{AD} wird der nächste Schätzwert \hat{d}_{AD4} in gleicher Weise geprüft, wie dies vorher beim Schätzwert \hat{d}_{AD3} beschrieben wurde. In einem Iterationsschritt werden nacheinander alle KN Schätzwerte $\hat{d}_{ADj}, j = 1 \dots KN$, geprüft. Die Iteration wird so lange fortgeführt, bis keine weitere Vektorkomponente von \hat{d}_{AD} modifiziert werden muß. Derjenige Teil in Fig. 4, der die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit $P_{PPDj}[e] = \hat{d}_{ML-PPDj}[e]$ darstellt, muß bei der seriellen Nachdetektion fortgelassen werden.

Was den für die serielle Nachdetektion erforderlichen Rechenaufwand angeht, so gelten die gleichen Darlegungen, die für die parallele Nachdetektion verbindlich sind. Die Rechenkomplexität der seriellen Nachdetektion ist im allgemeinen im Vergleich zur Rechenkomplexität der parallelen Nachdetektion wegen der beiden folgenden Gründe verringert. Erstens ist es bei der seriellen Nachdetektion im Gegensatz zur parallelen Nachdetektion nicht erforderlich, daß die in der Gleichung (21) angegebene Wahrscheinlichkeit $P_{PPDj}[e] = \hat{d}_{ML-PPDj}[e]$ berechnet und maximiert wird. Zweitens sind aufgrund der Tatsache, daß durch die serielle Nachdetektion der Schätzwert \hat{d}_{ADj} unmittelbar durch den Schätzwert $\hat{d}_{ML-SPDj}$ ersetzt wird, wenn $\hat{d}_{ADj} \neq \hat{d}_{ML-SPDj}$, so daß mehr als ein Datensymbolfehler bei einem Iterationsschritt korrigiert werden kann, im allgemeinen weniger Iterationsschritte als im Falle der parallelen Nachdetektion erforderlich. Als eine Folge davon ist allerdings das Leistungsvermögen der seriellen Nachdetektion im allgemeinen geringfügig schlechter als dasjenige der parallelen Nachdetektion.

Patentansprüche

1. Verfahren zur empfangsseitigen Datendetektion in einem System zur Übertragung von K aus Datensymbolen bestehenden Datenfolgen über einen Kanal oder K im allgemeinen unterschiedliche Kanäle, wobei jedem der Datensymbole der K Datenfolgen vor der Übertragung eine jeder Datenfolge zugeordnete spezifische Signalform zur Bildung der K Sendesignale aufmoduliert wird und aus dem aus der additiven Überlagerung der K verzerrten Sendesignale und eines möglicherweise zusätzlich auftretenden Störsignals bestehenden Empfangssignal unter Verwendung einer auf einer suboptimalen Maximum Likelihood (ML)-Schätzung basierenden zweistufigen Datendetektion, die sich aus einer einen Probeschätzwert von Datensymbolen der K Datenfolgen liefernden suboptimalen Hilfsdetektions-Stufe und aus einer sich daran anschließenden, auf einer Maximum Likelihood-Schätzung basierenden Nachdetektions-Stufe zur Prüfung des Probeschätzwertes aufgrund eines Maximum Likelihood-basierten Kriteriums zusammensetzt, ein endgültiger Schätzwert der Datensymbole der K Datenfolgen gewonnen wird, wobei die in der Hilfsdetektions-Stufe gewonnenen Probeschätzwerte der Datensymbole mit den entsprechenden Datensymbol-Schätzwerten der Maximum Likelihood-Schätzung auf Übereinstimmung geprüft und bei Unterschiedlichkeit geändert, d. h. durch die auf der Maximum Likelihood-Schätzung beruhenden Werte ersetzt werden, dadurch gekennzeichnet, daß das in der Nachdetektions-Stufe durchgeführte und auf der Maximierung der Wahrscheinlichkeit bezüglich der Datensymbole im empfangenen Signal beruhende Kriterium zur Ermittlung des optimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwerts von Datensymbolen nur bei einem ausgewählten Satz aller Datensymbole anstelle bei allen Datensymbolen verwendet wird und daß als Konsequenz davon nur ein entsprechend ausgewählter Satz der in der Hilfsdetektions-Stufe ermittelten Probeschätzwerte auf Übereinstimmung geprüft und bei Unterschiedlichkeit geändert, d. h. durch auf der Maximum Likelihood-Schätzung beruhende Werte ersetzt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der zur Prüfung in der Nachdetektions-Stufe ausgewählte Satz von Probeschätzwerten diejenigen Werte enthält, die am wenigsten zuverlässig und somit am ehesten falsch sind.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß die Energien der K kombinierten Kanalimpulsantworten herangezogen werden.

4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß das Signal-Stör-Verhältnis am Ausgang der Hilfsdetektions-Stufe herangezogen wird.

5. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß die Lage eines wertkontinuierlichen Schätzwerts in der komplexen Ebene herangezogen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß die Wahrscheinlichkeit einer falschen Entscheidung oder eines Datensymbolfehlers herangezogen wird.

7. Verfahren zur empfangsseitigen Datendetektion in einem System zur Übertragung von K aus Datensymbolen bestehenden Datenfolgen über einen Kanal oder K im allgemeinen unterschiedliche Kanäle, wobei jedem der Datensymbole der K Datenfolgen vor der Übertragung eine jeder Datenfolge zugeordnete spezifische Signalform zur Bildung der K Sendesignale aufmoduliert wird und aus dem aus der additiven

Überlagerung der K verzerrten Sendesignale und eines möglicherweise zusätzlich auftretenden Störsignals bestehenden Empfangssignal unter Verwendung einer auf einer suboptimalen Maximum Likelihood (ML)-Schätzung basierenden zweistufigen Datendetektion, die sich aus einer einen Probeschätzwert von Datensymbolen der K Datenfolgen liefernden suboptimalen Hilfsdetektions-Stufe und aus einer sich daran anschließenden, auf einer Maximum Likelihood-Schätzung basierenden Nachdetektions-Stufe zur Prüfung des Probeschätzwertes aufgrund eines Maximum Likelihood-basierten Kriteriums zusammensetzt, ein endgültiger Schätzwert der Datensymbole der K Datenfolgen gewonnen wird, wobei die in der Hilfsdetektions-Stufe gewonnenen Probeschätzwerte der Datensymbole mit den entsprechenden Datensymbol-Schätzwerten der Maximum Likelihood-Schätzung auf Übereinstimmung geprüft und bei Unterschiedlichkeit geändert, d. h. durch die auf der Maximum Likelihood-Schätzung beruhenden Werte ersetzt werden, dadurch gekennzeichnet, daß anstelle des zu optimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwerten für die übertragenen Datensymbole der K Datenfolgen führenden Kriteriums in der Nachdetektions-Stufe zur Prüfung der in der Hilfsdetektions-Stufe ermittelten Probeschätzwerte ein Kriterium benutzt wird, das aufgrund des Ersatzes der Maximierung der Wahrscheinlichkeit bezüglich der Datensymbole im empfangenen Signal durch eine Annäherung zu suboptimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwerten führt.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß für denjenigen Fall, bei dem die Größe des Datensymbolalphabets größer als zwei ist, die Annäherung darin besteht, daß anstelle des Maximums über alle Datensymbole der Symbolalphabetmenge nur das Maximum über einen ausgewählten Satz aller Datensymbole dieser Menge bestimmt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß zur Prüfung des Probeschätzwertes in der Nachdetektions-Stufe bei der Wahrscheinlichkeitsmaximierung und der Bestimmung eines optimalen ML-basierten Schätzwertes von einer Wahrscheinlichkeit ausgegangen wird, die auf einer Summierung über alle Datenvektoren beruht, von denen jeweils eine Komponente fixiert ist und alle anderen Komponenten variiert werden, und daß bei der Bestimmung des suboptimalen ML-basierten Schätzwertes diese Wahrscheinlichkeit durch eine angenäherte Wahrscheinlichkeit ersetzt wird, wobei in einem ausgewählten Komponentensatz anstatt aller anderen Komponenten nur ein Teil davon variiert wird und der restliche Teil davon fixiert bleibt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Ermittlung der angenäherten Wahrscheinlichkeit und des suboptimalen ML-basierten Schätzwertes die fixierten anderen Komponenten im ausgewählten Komponentensatz gleich dem korrespondierenden Probeschätzwert gelassen werden, der bei der Hilfsdetektion ermittelt wurde.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß in der Nachdetektions-Stufe die von der Hilfsdetektions-Stufe ermittelten Probeschätzwerte mittels eines iterativen Prozesses nachgeprüft werden.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß beim iterativen Prozeß in einem ersten Schritt im Rahmen der Nachdetektion die ML-basierten Schätzwerte für alle Datenkomponenten ermittelt werden und jeder dieser ermittelten Schätzwerte mit dem komponentenmäßig entsprechenden Probeschätzwert verglichen wird, daß in einem ersten Fall, bei dem sich für keine der Komponenten der ML-basierte Schätzwert und der Probeschätzwert unterscheiden, die Probeschätzwerte allesamt unverändert bleiben und somit keine weiteren Iterationsschritte mehr folgen, daß in einem zweiten Fall, bei dem sich genau für eine Datenkomponente der bei der Nachdetektion ermittelte ML-basierte Schätzwert vom jeweiligen Probeschätzwert unterscheidet, dieser eine Probeschätzwert durch den ermittelten ML-basierten Schätzwert ersetzt wird und ein weiterer Iterationsschritt nach Gleichsetzung des gesamten geschätzten Probeschätzwertvektors mit dem gesamten geschätzten ML-basierten Schätzwertvektor ausgeführt wird, und daß in einem dritten Fall, bei dem sich für mehrere Datenkomponenten der bei der Nachdetektion ermittelte, ML-basierte Schätzwert und der jeweilige Probeschätzwert unterscheiden, lediglich ein Unter-Satz der sich unterscheidenden Probeschätzwerte im ersten Schritt geändert wird und dann ein weiterer Iterationsschritt nach Gleichsetzung des gesamten geschätzten Probeschätzwertvektors mit dem gesamten geschätzten ML-basierten Schätzwertvektor ausgeführt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß eine feste Anzahl von maximal auszuführenden Iterationsschritten vorgeschrieben ist.

14. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß hinsichtlich der Anzahl der maximal sich unterscheidenden Probeschätzwerte im Unter-Satz ein fester Wert vorgeschrieben ist, der überschritten werden muß, damit ein weiterer Iterationsschritt zugelassen wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Komponentensatz so ausgewählt ist, daß die Komponenten, die bei der Ermittlung der angenäherten Wahrscheinlichkeit fixiert bleiben, insbesondere diejenigen Komponenten sind, die am zuverlässigsten sind.

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß die Energien der K kombinierten Kanalimpulsantworten herangezogen werden.

17. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß das Signal-Stör-Verhältnis am Ausgang der Hilfsdetektions-Stufe herangezogen wird.

18. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß die Lage eines wertkontinuierlichen Schätzwerts in der komplexen Ebene herangezogen wird.

19. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß als Zuverlässigkeitsmaß die Wahrscheinlichkeit einer falschen Entscheidung oder eines Datensymbolfehlers herangezogen wird.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Komponentensatz so ausgewählt ist, daß die Komponenten den geringsten, durch Intersymbolinterferenzen (ISI) und Vielfachzugriffsinterferenzen (MAI) entstehenden Einfluß auf den bei der Nachdetektion ermittelten ML-basierten

Schätzwert haben.

21. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Unter-Satz so gewählt wird, daß nicht mehr als ein Probeschätzwert bei jedem Iterationsschritt geändert wird.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der zu ändernde Probeschätzwert der zuverlässigste aller Probeschätzwerte ist, für die sich beim Vergleich abweichende L-basierte Schätzwerte ergeben haben.

23. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer so bezeichneten parallelen Nachdetektion alle Komponenten bei der Ermittlung der angenäherten Wahrscheinlichkeit fixiert sind, daß die Vorgehensweise in den erwähnten beiden ersten Fällen wie im Anspruch 12 angegeben ist, daß im dritten im Anspruch 12 erwähnten Fall genau ein Probeschätzwert geändert wird, d. h. beim aktuellen Iterationsschritt durch den jeweils dafür ermittelten ML-basierten Schätzwert ersetzt wird, wobei von mehreren zu ändernden Schätzwerten derjenige ausgewählt wird, der zu einer maximalen Wahrscheinlichkeit führt, daß ein weiterer Iterationsschritt durch Setzen des gesamten Probeschätzwertvektors gleich dem gesamten ermittelten ML-basierten Schätzwertvektor ausgelöst wird, so daß dann wiederum die vorgenannten Operationen ausgelöst werden, daß die Iteration so lange fortgesetzt wird, bis der Algorithmus für die Nachdetektion konvergiert, d. h. bis in einem weiteren Iterationsschritt kein Probeschätzwert mehr zu ändern ist und damit ein weiterer Iterationsschritt nicht mehr zu einer Abnahme des quadratischen Euklidischen Abstandes führt, und daß alle Komponentenprobeschätzwerte parallel geprüft werden, indem die quadratischen Euklidischen Abstände parallel berechnet werden und dann bestimmt wird, welcher der Probeschätzwerte geändert wird.

24. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer so bezeichneten seriellen Nachdetektion alle Komponenten bei der Ermittlung der angenäherten Wahrscheinlichkeit fixiert sind, daß die Vorgehensweise in den erwähnten beiden ersten Fälle wie im Anspruch 12 angegeben ist, daß im dritten im Anspruch 12 erwähnten Fall der Reihe nach Probeschätzwerte geändert werden, d. h. beim aktuellen Iterationsschritt durch jeweils dafür ermittelte ML-basierte Schätzwerte ersetzt werden, daß ein weiterer Iterationsschritt durch Setzen des gesamten Probeschätzwertvektors gleich dem gesamten ermittelten ML-basierten Schätzwertvektor ausgelöst wird, so daß dann wiederum die vorgenannten Operationen ausgelöst werden, und daß die Iteration so lange in aufeinanderfolgenden Schritten fortgesetzt wird, bis der Algorithmus für die Nachdetektion konvergiert, d. h. bis in einem weiteren Iterationsschritt kein Probeschätzwert mehr zu ändern ist und damit ein weiterer Iterationsschritt nicht mehr zu einer Abnahme des quadratischen Euklidischen Abstandes führt.

25. Verfahren nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß vor Beginn der seriellen Nachdetektion eine Kanalsortierung durchgeführt wird.

26. Verfahren zur empfangsseitigen Datendetektion in einem System zur Übertragung von K aus Datensymbolen bestehenden Datenfolgen über einen Kanal oder K im allgemeinen unterschiedliche Kanäle, wobei jedem der Datensymbole der K Datenfolgen vor der Übertragung eine jeder Datenfolge zugeordnete spezifische Signalform zur Bildung der K Sendesignale aufmoduliert wird und aus dem aus der additiven Überlagerung der K verzerrten Sendesignale und eines möglicherweise zusätzlich auftretenden Störsignals bestehenden Empfangssignal unter Verwendung einer auf einer suboptimalen Maximum Likelihood (ML)-Schätzung basierenden zweistufigen Datendetektion, die sich aus einer einen Probeschätzwert von Datensymbolen der K Datenfolgen liefernden suboptimalen Hilfsdetektions-Stufe und aus einer sich daran anschließenden, auf einer Maximum Likelihood-Schätzung basierenden Nachdetektions-Stufe zur Prüfung des Probeschätzwertes aufgrund eines Maximum Likelihood-basierten Kriteriums zusammensetzt, ein endgültiger Schätzwert der Datensymbole der K Datenfolgen gewonnen wird, wobei die in der Hilfsdetektions-Stufe gewonnenen Probeschätzwerte der Datensymbole mit den entsprechenden Datensymbol-Schätzwerten der Maximum Likelihood-Schätzung auf Übereinstimmung geprüft und bei Unterschiedlichkeit geändert, d. h. durch die auf der Maximum Likelihood-Schätzung beruhenden Werte ersetzt werden, dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 bis 6 mit dem Verfahren gemäß den Ansprüchen 7 bis 25 kombiniert ist, derart, daß das zu einem suboptimalen Maximum Likelihood-basierten Schätzwert führende Kriterium lediglich bei einem ausgewählten Satz aller Datensymbole angewandt wird.

27. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur suboptimal ausgebildeten Hilfsdetektion eine lineare Datendetektion vorgesehen ist, die z. B. auf DMF (Decorrelating Matched Filter), ZF-BLE (Zero Forcing Block Linear Equalizer) oder MMSE-BLE (Minimum Mean Square Error Block Linear Equalizer) beruht.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß zur suboptimal ausgebildeten Hilfsdetektion eine sogenannte DF (Decision Feedback)-Detektion vorgesehen ist, die z. B. auf DMF-BDFE (DMF-Block Decision Feedback Equalizer), ZF-BDFE (ZF-Block Decision Feedback Equalizer) oder MMSE-BDFE (MMSE-Block Decision Feedback Equalizer) beruht.

29. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Anwendung bei einem CDMA-Signalübertragungssystem.

30. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch die Anwendung in der Abwärtsstrecke (downlink) und/oder Aufwärtsstrecke (uplink) eines Mobilfunksystems in den Empfängern der Stationen.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

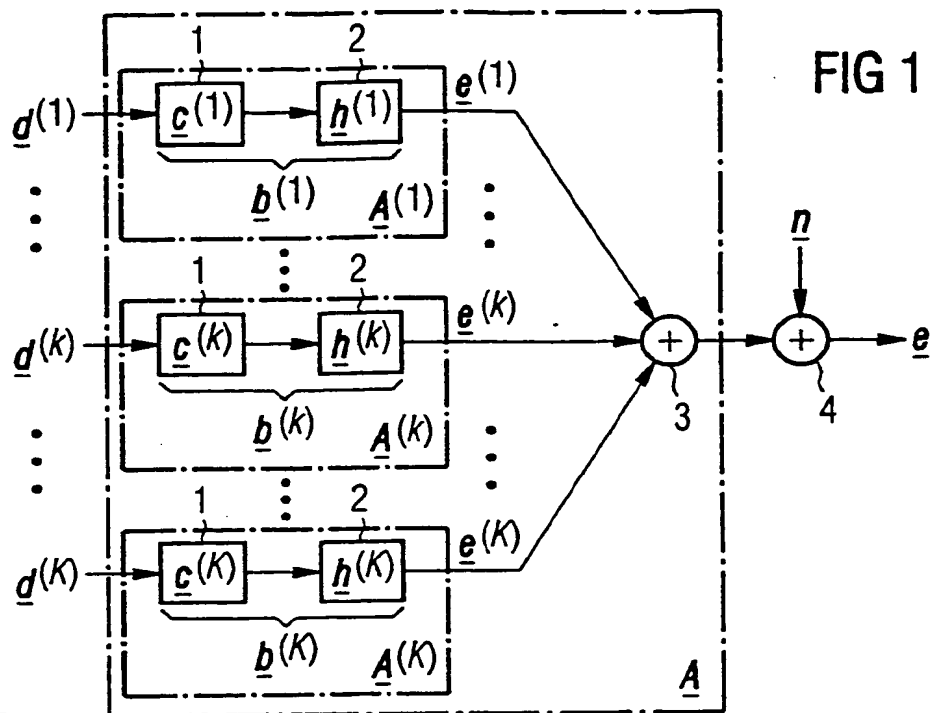


FIG 2

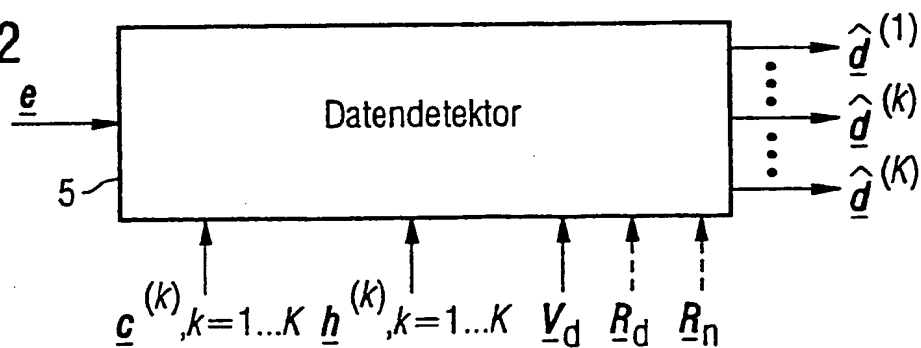
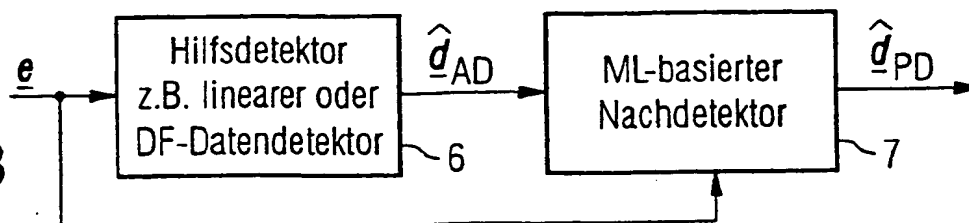


FIG 3



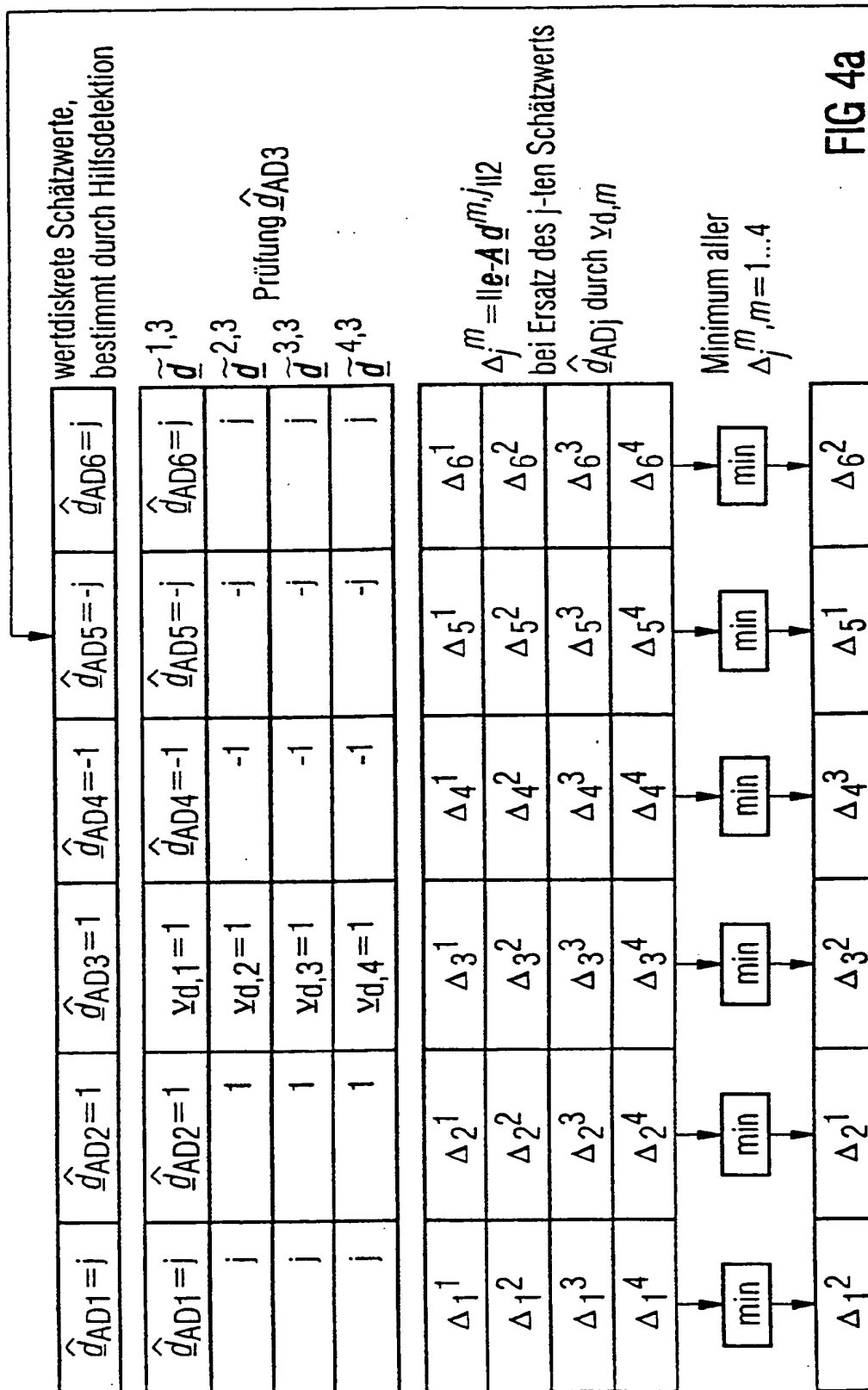
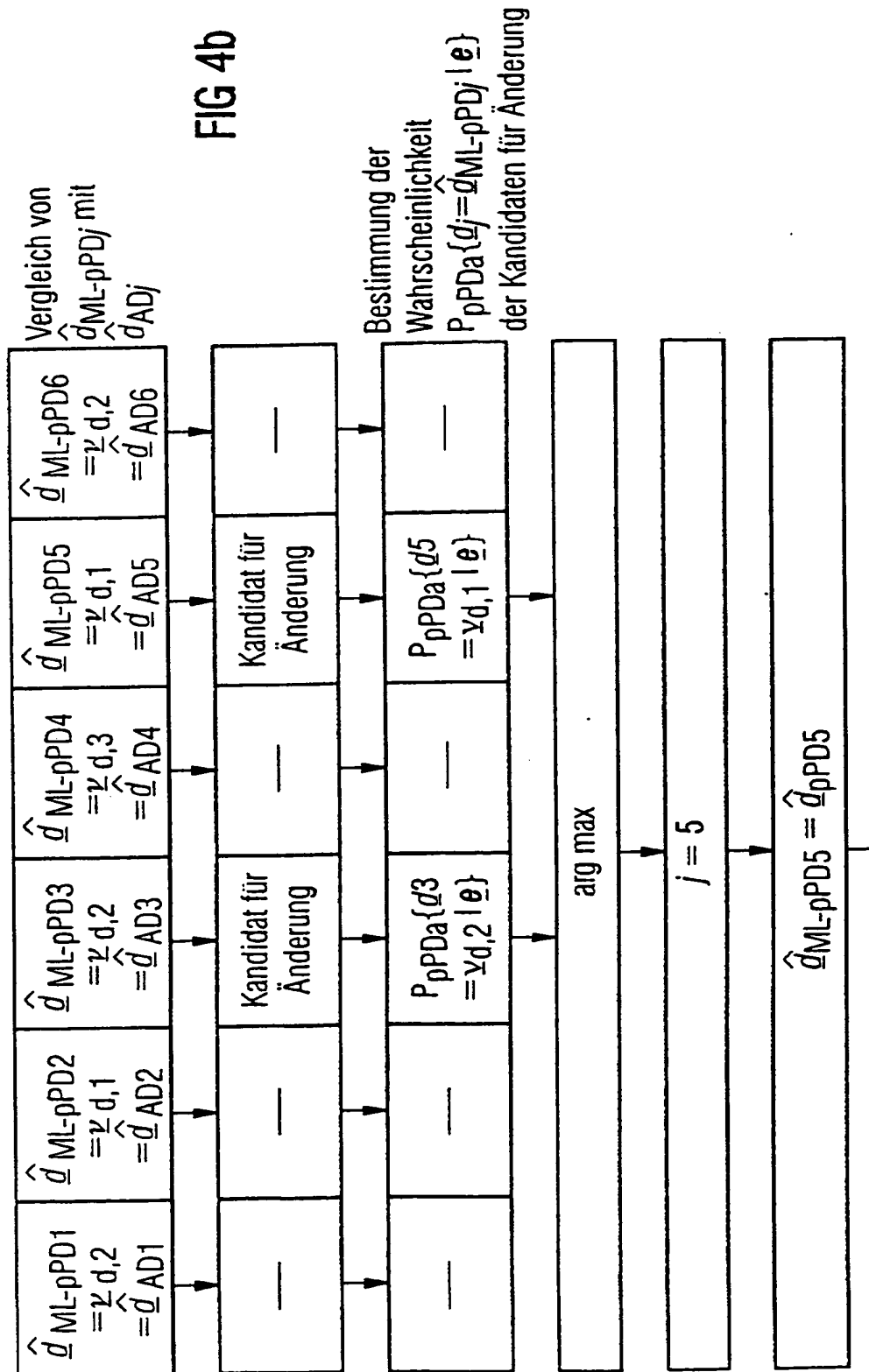


FIG 4b



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.